



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño e implementación de un sistema de exposición
in-vitro a campos magnéticos de frecuencias
extremadamente bajas automatizadas y controladas
electrónicamente**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Bladimir Ilish GUEVARA MINAYA

ASESOR

Víctor Manuel CRUZ ORNETTA

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Guevara, B. (2018). *Diseño e implementación de un sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas automatizadas y controladas electrónicamente*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres América y Policarpo, ellos que me mostraron el camino para llegar a ser la persona que soy el día de hoy, por darme todo lo que necesitaba y no dejarme desfallecer en ningún momento.

A mi tía Lucia por estar acompañándome desde que tengo memoria, por ser ejemplo para mí, tanto como fueron mis padres.

A mis primos Rocío, Julio, Toño y demás familia, por aguantarme en los momentos de duda y frustración, y darme una frase de apoyo.

Y a mi novia Almendra, por estar en todo momento brindándome apoyo, no dejándome flaquear y dándome fuerzas en todo momento para culminar este trabajo.

Agradecimientos

Un sincero agradecimiento a mi alma mater y segunda casa, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a mis docentes por sentar las bases de la profesión en mí para llegar a ser un profesional capaz y digno representante de nuestra casa de estudios.

Al Ing. William Torres Santos y Ing. Yuri Arieta Laya por su dedicación y paciencia en la ayuda de la elaboración de los protocolos y recomendaciones seguidas en el diseño del presente trabajo de tesis.

Sobre todo, agradecimiento al Dr. Víctor Manuel Cruz Ornetta, por su constante asesoría en el enfoque y desarrollo del presente proyecto.

También un especial agradecimiento a Christopher, Cristhians, Noe y Almendra por su ayuda durante la redacción del proyecto.

Resumen

El objetivo del presente trabajo de tesis fue el diseño e implementación de un sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas (ELF) teniendo una supervisión completamente óptima y de alta precisión, todo esto es posible debido a un control automatizado electrónicamente. Este sistema de exposición nos permitirá realizar exposiciones ciegas (Sham).

El diseño del sistema se basó en la utilización de dos pares de bobinas, las cuales tienen la cantidad de 200 vueltas c/u con un calibre de cable número 21, estas bobinas se encuentran separadas a 3 y 6 cm del centro respectivamente, garantizando de esta forma la uniformidad de exposición a campos magnéticos en el interior del sistema.

Este sistema de bobinas es el responsable de la generación de campo magnético ya que por ellas circula el flujo de corriente que depende del voltaje de alimentación y la forma de onda de entrada (senoidal, cuadrada, triangular y arbitraria).

Se incorporó 2 ventiladores en ambos extremos tanto para la ventilación y extracción del aire caliente, un sensor pt100 que será el encargado de monitorear en cada instante el valor de temperatura dentro del sistema de exposición.

La etapa de alimentación del sistema se logró mediante un generador de funciones arbitrarias que a su vez alimentará el sistema electrónico de amplificación de potencia, el cual se encuentra fuera de la incubadora comercial y se conecta a la bobina mediante cables auxiliares.

El conjunto de bobinas se instaló dentro de una caja metálica de acero quirúrgico la cual cuenta con un blindaje de micrometal, este material tiene la finalidad de aislar el interior del sistema de exposición y protegerlo de alguna perturbación electromagnética proveniente del exterior.

Se diseñó e implementó un generador de funciones arbitrarias en la etapa final de la elaboración del presente trabajo de tesis, este equipo electrónico cumple con todas las características técnicas y parámetros de funcionamiento en comparación de un generador de funciones comercial.

Como resultado final se logró obtener una gran variación de campo magnético a la salida del sistema de exposición in-vitro, este valor oscila entre (5uT – 2mT) para el nivel de voltaje ($0.1V_{pp}$ - $12V_{pp}$) que brinda el generador de funciones comercial.

El nivel de temperatura para cualquier valor de campo magnético se mantiene en 37°C.

El nivel de campo magnético en el grupo de exposición ficticia se atenúa tremendamente gracias al blindaje con el micro metal, esto garantiza que ambos sistemas de exposición puedan trabajar juntos dentro de la misma incubadora comercial.

En conclusión, se logró obtener un sistema de exposición in vitro a campos magnéticos de extremadamente bajas frecuencias que cumple con todas las características técnicas planteadas en el diseño inicial. Pasando satisfactoriamente todas las pruebas de funcionamiento.

Palabras claves: Radiaciones no ionizantes, sistema de exposición in-vitro, campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas.

Abstract

The objective of this thesis work was the design and implementation of an in-vitro exposure system to magnetic fields of extremely low frequencies (ELF) having a completely optimal supervision and high precision, all this is possible due to an electronically automated control . This exposure system will allow us to make blind exposures (Sham).

The design of the system was based on the use of two pairs of coils, which have the quantity of 200 rounds each with a caliber of wire number 21, these coils are separated to 3 and 6 cm from the center respectively, guaranteeing This forms the uniformity of exposure to magnetic fields inside the system.

This system of coils is responsible for the generation of magnetic field since they flow through them that depends on the supply voltage and the input waveform (sinusoidal, square, triangular and arbitrary).

It incorporated 2 fans at both ends for both ventilation and extraction of hot air, a pt100 sensor that will be responsible for monitoring at all times the temperature value within the exposure system.

The stage of feeding the system was achieved by means of a generator of arbitrary functions that in turn will feed the electronic system of power amplification, which is outside the commercial incubator and is connected to the coil by means of auxiliary cables.

The set of coils was installed inside a metal surgical steel box which has a micrometal shield, this material has the purpose of isolating the interior of the exposure system and protecting it from any electromagnetic disturbance coming from the outside.

A generator of arbitrary functions was designed and implemented in the final stage of the elaboration of this thesis work, this electronic equipment complies with all the technical characteristics and operating parameters compared to a commercial function generator.

As a final result it was possible to obtain a large magnetic field variation at the output of the in-vitro exposure system, this value oscillates between (5 μ T - 2mT) for the voltage level ($0.1V_{pp}$ - $12V_{pp}$) provided by the commercial function generator.

The temperature level for any magnetic field value is maintained at 37 ° C.

The level of magnetic field in the fictitious exposure group is greatly attenuated by the shielding with the micro metal, this guarantees that both exposure systems can work together within the same commercial incubator.

In conclusion, it was possible to obtain a system of in vitro exposure to magnetic fields of extremely low frequencies that meets all the technical characteristics proposed in the initial design. Passing all the functional tests satisfactorily.

Keywords: Non-ionizing radiation, In-vitro exposure system, magnetic fields of extremely low frequencies.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1 Introducción	1
Planteamiento del problema.....	1
Justificación	3
Justificación teórica	3
Justificación práctica.....	3
Objetivos	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
Capítulo 2 Marco teórico	5
Antecedentes	5
Base Teórica.....	11
Ondas electromagnéticas y sus principales características	11
<i>Radiaciones ionizantes</i>	14
<i>Radiación No Ionizante</i>	14
<i>Campos estáticos 0 Hz</i>	15
<i>Campos de frecuencia bajas 1 Hz - 300 Hz</i>	15
<i>Campos de frecuencia intermedia 300 Hz-10 MHz</i>	15
<i>Campos de alta frecuencia o radiofrecuencia 10 MHz-300 GHz</i>	15
Regiones de propagación.	15
<i>Campo cercano.</i>	16
<i>Campo lejano.</i>	16
Campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas producidos por las redes de energía eléctrica	17
Interacción de los campos electromagnéticos de extremadamente baja frecuencia con el cuerpo humano.....	18

Efectos sobre la Salud debido a la Exposición a Campos Electromagnéticos.....	21
Estudios in – vitro aplicados a los campos electromagnéticos	24
Límites de Exposición a Campos Magnéticos de Frecuencias Extremadamente Bajas (ELF)	
.....	25
Normativa Internacional	25
La recomendación ICNIRP 1998.....	25
Restricciones básicas para campos magnéticos de baja frecuencia.....	27
Recomendaciones ICNIRP 2010	29
Restricciones Básicas ICNIRP 2010.....	29
Niveles de Referencia ICNIRP 2010	29
Exposición a frecuencias múltiples.....	31
Nacional	33
Decreto Supremo N° 010-2005-PCM.....	33
Sistemas de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas	
basados en cuatro bobinas cuadas.	35
Ley de inducción de Faraday	35
Capítulo 3 Metodología de desarrollo del proyecto.....	36
Principales Características del diseño de exposición.....	38
Implementación del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias	
extremadamente bajas	40
Implementación caja metálica de acero quirúrgico y sistema de portabobinas	40
Implementación del blindaje con el micro metal	43
Principales características del micro metal y pruebas de funcionamiento.....	44
Costos de fabricación caja metálica de acero quirúrgico y sistema de portabobinas .	47
Implementación Del Control De Temperatura	47

Costo sonda Pt100 y controlador de temperatura Schneider	48
Implementación del circuito electrónico de amplificación de corriente.....	49
Costos de fabricación circuito electrónico amplificador de corriente	54
Pruebas de funcionamiento y rendimiento de la tarjeta electrónica de amplificación de corriente	55
Ensamblaje final y prueba de campo magnético.....	56
Diseño e implementación de un generador de funciones arbitrarias	59
Planteamiento del generador de funciones arbitrarias	59
Etapas del generador.....	62
<i>Control central</i>	62
<i>Memoria RAM</i>	63
<i>Oscilador dedicado</i>	66
<i>Conversor digital Analógico</i>	67
<i>Acondicionador de señal</i>	68
<i>Fuente de alimentación</i>	69
Funcionamiento	70
Fabricación del generador de funciones arbitrarias.	71
Pruebas de funcionamiento del generador de funciones arbitrarias	73
Costos de fabricación del generador de funciones arbitrarias	75
Capítulo 4 Resultados y evaluación del sistema	76
Ensamblaje del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas en el Laboratorio de Fisiología de la Reproducción (LFR), Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.....	76
Medición de radiaciones no ionizantes provenientes del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas	79

Medición de la temperatura dentro del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas	80
Resultados de las pruebas de exposición a radiaciones no ionizantes producidos por el sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas.	82
Caracterización del campo magnético fuera de la incubadora comercial	92
Capítulo 5 Conclusiones	93
Referencias bibliográficas.....	95
Apéndice A: Recomendación ICNIRP 2010	103
Apéndice B: Hoja de especificaciones técnicas EFA-300	123
Apéndice C: Hoja de especificaciones técnicas NBM-550	133
Apéndice D: Certificados de calibración Narda NBM – 550 y Sonda EHP-50F	143
Apéndice E: Datos totales de medición de radiaciones no ionizantes usando el NBM – 550	152

Lista de tablas

Tabla 1 Campo magnético en domicilios, medido en tres puntos diferentes.....	20
Tabla 2 Valores de campo magnético para algunos equipos de la mediana industria.	21
Tabla 3 Efectos biológicos a corto plazo de la densidad de corriente inducida.	22
Tabla 4 Estudios epidemiológicos sobre líneas eléctricas y leucemia infantil.	23
Tabla 5 Niveles de referencia para la exposición para público general a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (valores eficaces rms).....	26
Tabla 6 Niveles de referencia para la exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (valores eficaces rms).....	27
Tabla 7	28
Tabla 8 Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias entre 1 Hz y 100 kHz (valores eficaces rms).....	30
Tabla 9 Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias entre 1 Hz y 100 kHz (valores eficaces no perturbados)	30
Tabla 10 Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para la	32
Tabla 11 Niveles de referencia para exposición a campos eléctricos y magnéticos para la frecuencia de 60 Hz (valores eficaces no perturbados).	33
Tabla 12	34
Tabla 13 Principales características técnicas del micro metal	44
Tabla 14 Demostración blindaje del campo magnético con el micro metal (con grosor de 0,35 mm).....	46
Tabla 15 Costo de implementación caja metálica de acero quirúrgico y sistema	47
Tabla 16 Costo sonda Pt100 y controlador de temperatura Schneider	48
Tabla 17 Costo de implementación circuito electrónico amplificador de corriente	54
Tabla 18 Costo de implementación del generador de funciones arbitrarias	75

	xiii
Tabla 19 Principales características de la sonda EHP-50F	79
Tabla 20 Resumen de pruebas utilizando el medidor de RNI NBM-550	91

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Diagrama esquemático de los campos electromagnéticos	11
<i>Figura 2.</i> Espectro electromagnético.....	13
<i>Figura 3.</i> Regiones de campo en torno a la fuente EM (se supone que la máxima dimensión de la antena D es grande comparada con la longitud de onda λ).	16
<i>Figura 4.</i> Distribución de la energía eléctrica y componentes generadores de CEM.....	18
<i>Figura 5.</i> Interacción entre los campos eléctricos y magnéticos con el cuerpo humano.....	19
<i>Figura 6.</i> Criterios para la adopción de las restricciones básicas para ELF 60 Hz	32
<i>Figura 7.</i> Criterios para la adopción de los niveles de referencia para ELF 60 Hz.....	33
<i>Figura 8.</i> Diagrama General Del Sistema De Exposición In-Vitro.....	37
<i>Figura 9.</i> Vista de corte del sistema de exposición in-vitro	38
<i>Figura 10.</i> Diseño Final Caja Metálica.....	40
<i>Figura 11.</i> Caja metálica acabado final	41
<i>Figura 12.</i> Caja metálica, vista superior.....	41
<i>Figura 13.</i> Sistema de Porta Bobinas	42
<i>Figura 14.</i> Sistema de Porta Bobinas	42
<i>Figura 15.</i> Blindaje con la lámina de micro metal	43
<i>Figura 16.</i> Utilización de pegamento industrial para pegar la lámina de micro metal.....	43
<i>Figura 17.</i> Pruebas de blindaje del campo magnético con el micro metal	45
<i>Figura 18.</i> Blindaje del campo geomagnético utilizando la plancha de micro metal.....	46
<i>Figura 19.</i> Sonda Pt100 y controlador de temperatura Schneider	48
<i>Figura 20.</i> Distribución de pines IC TDA 7294	49
<i>Figura 21.</i> Diagramas de bloques IC TDA 7294.....	50
<i>Figura 22.</i> Diagrama esquemático circuito electrónico de potencia	51

<i>Figura 23.</i> Vista frontal tarjeta impresa (PCB)	52
<i>Figura 24.</i> Vista trasera tarjeta impresa (PCB)	52
<i>Figura 25.</i> Tarjeta electrónica final	53
<i>Figura 26.</i> Pruebas de funcionamiento etapa de amplificación de corriente.....	55
<i>Figura 27.</i> Ensamblaje final, para la generación de campo magnético	56
<i>Figura 28.</i> Flujo de corriente para la generación de campo magnético.....	57
<i>Figura 29.</i> Prueba de campo magnético usando el medidor semi-selectivo EFA - 300.....	58
<i>Figura 30.</i> Código en “C” para la generación de la onda senoidal.....	60
<i>Figura 31.</i> Muestras generadas para la señal senoidal	61
<i>Figura 32.</i> Código en “C” para la generación de la onda cuadrada	61
<i>Figura 33.</i> Código en “C” para la generación de la onda Sierra	62
<i>Figura 34.</i> Gráfica del bloque de control.....	63
<i>Figura 35.</i> Gráfica del bloque de la RAM.....	64
<i>Figura 36.</i> Reset del microcontrolador 4040 usando la compuerta AND	65
<i>Figura 37.</i> Control del reloj del contador de direcciones	66
<i>Figura 38.</i> Oscilador independiente	67
<i>Figura 39.</i> DAC resistivo	67
<i>Figura 40.</i> Acondicionar de señal.....	68
<i>Figura 41.</i> Comparación de la salida del DAC y el filtrado de la señal	68
<i>Figura 42.</i> Proceso de amplificación usando el potenciómetro de control de amplitud.....	69
<i>Figura 43.</i> Esquema dela fuente de alimentación.....	70
<i>Figura 44.</i> Interfaz del generador de funciones arbitrarias con las funciones mostradas.....	70
<i>Figura 45.</i> Grabado de la PCB mediante el método de la plancha.....	71
<i>Figura 46.</i> Soldadura de los componentes electrónicos para el acabo final de la tarjeta electrónica.	72

<i>Figura 47.</i> Pantalla TFT Nextion insertada en la caja	72
<i>Figura 48.</i> Grabación del programa en el microcontrolador atmega32 y prueba de la pantalla	73
<i>Figura 49.</i> Prueba de funcionamiento para la onda senoidal.....	73
<i>Figura 50.</i> Prueba de funcionamiento para la onda diente de sierra	74
<i>Figura 51.</i> Prueba de funcionamiento para la onda cuadrada	74
<i>Figura 52.</i> Ensamblaje del sistema de exposición a campos magnéticos.....	77
<i>Figura 53.</i> Sistema de exposición a campos magnéticos listo para su uso.....	77
<i>Figura 54.</i> De izquierda a derecha: grupo expuesto y grupo de exposición simulada	78
<i>Figura 55.</i> Medición de campo magnético en el interior del sistema de exposición.....	79
<i>Figura 56.</i> Medición de temperatura usando el sensor Pt100	81
<i>Figura 57.</i> Medición de temperatura usando el Fluke 179	81
<i>Figura 58.</i> Sonda EHP-50F dentro de la apertura donde se colocarán los cultivos celulares .	83
<i>Figura 59.</i> Conexión al equipo remoto NBM-550 mediante el cable óptico	83
<i>Figura 60.</i> Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 1.6 V_{pp}	84
<i>Figura 61.</i> Atenuación de casi 15 veces en el grupo de exposición ficticia.....	84
<i>Figura 62.</i> Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 2.2 V_{pp}	85
<i>Figura 63.</i> Atenuación de casi 19 veces en el grupo de exposición ficticia.....	85
<i>Figura 64.</i> Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 2.7 V_{pp}	86
<i>Figura 65.</i> Atenuación de casi 35 veces en el grupo de exposición ficticia.....	86
<i>Figura 66.</i> Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 4.1 V_{pp}	87
<i>Figura 67.</i> Atenuación de casi 80 veces en el grupo de exposición ficticia.....	87
<i>Figura 68.</i> Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 5 V_{pp}	88
<i>Figura 69.</i> Atenuación de casi 85 veces en el grupo de exposición ficticia.....	88
<i>Figura 70.</i> Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 6.5 V_{pp}	89

<i>Figura 71.</i> Atenuación de casi 52 veces en el grupo de exposición ficticia.....	89
<i>Figura 72.</i> Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 10.5 V_{pp}	90
<i>Figura 73.</i> Atenuación de casi 39 veces en el grupo de exposición ficticia.....	90
<i>Figura 74.</i> Medición de campo magnético fuera de la incubadora comercial.....	92

Capítulo 1

Introducción

Planteamiento del problema

La exposición a diferentes frecuencias de campos electromagnéticos (CEM) está aumentando significativamente a medida que la tecnología avanza. En particular, las fuentes CEM de frecuencia extremadamente baja (0-300 Hz) en la comunidad pueden provenir de diferentes fuentes como el cableado de edificios, líneas eléctricas, fábricas, equipos de oficina, hogar y electrodomésticos (Yan, Don, Zhang, & Qi, 2010).

La demanda constante de energía eléctrica se ha masificado en estos últimos años convirtiéndose en una necesidad primaria por las ventajas que nos provee. En la actualidad se puede apreciar que las torres de alta tensión conviven cada vez más cerca de las personas debido al crecimiento demográfico que se han producido estos últimos años.

De acuerdo al Ministerio de Energía y Minas al año 2015 la potencia instalada era 12252 MW para una demanda máxima de 6275 MW, con una producción eléctrica de 48066 GWh y 6.7 millones de clientes que totalizaron una demanda de energía de 39706 GWh. Siendo el consumo de energía eléctrica per cápita 1355 (kWh / Habitante). Al término del año 2015 se contaba con 1 838 km de líneas en 500 kV y 8 665 km de líneas en 220 kV (Ministerio de Energía y Minas, 2016).

En el período 2006 – 2016 la tasa anual promedio del Producto Bruto Interno (PBI) fue de 5,7% y el crecimiento del sector eléctrico estuvo altamente correlacionado con el desempeño de la economía nacional; esto debido a que la mayoría de las actividades económicas requieren de la energía eléctrica. Durante este periodo se observó un mayor crecimiento en los sectores construcción, comercio, servicios, electricidad y agua; siendo el sector eléctrico uno de los que más contribuyó con la expansión de la economía a través del suministro de energía a los diversos sectores productivos que la necesitan. En el 2016, el

consumo per cápita de energía eléctrica fue de 1446 kWh, valor que es menor al promedio latinoamericano; lo cual muestra que aún hay un espacio para realizar mayores inversiones en las actividades de generación, transmisión y distribución (MINEN, 2017).

La población del país aumenta cada día, el desarrollo y el progreso producen incrementos en la cantidad de energía que necesita el consumidor. También crecen todas las actividades económicas de la población, tales como la industria, el comercio, el alumbrado público y el turismo. Por esa razón, cada cierto período de tiempo es necesario incrementar tanto la cantidad de energía producida como la capacidad de los sistemas para su transmisión y distribución (Centro de Servicio Gestión Ambiental de la UEN Proyectos y Servicios Asociados, 2011); sin embargo, las instalaciones de transmisión y distribución de electricidad, el cableado y aparatos eléctricos domésticos generan niveles de campos eléctricos y magnéticos en el hogar. Los hogares que no estén situados cerca de líneas de conducción eléctrica tendrán una intensidad de campo electromagnético alrededor de $0,2 \mu\text{T}$. Los campos electromagnéticos de los lugares situados directamente bajo las líneas de conducción eléctrica son mucho más intensos. Las densidades de flujo magnético a nivel del suelo pueden ser del orden de hasta varios μT (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Estas radiaciones no ionizantes de frecuencia extremadamente baja han mostrado tener efecto sobre los sistemas biológicos y se ha informado que estos pueden afectar la velocidad de reacciones y una gran cantidad de procesos bioquímicos (Castelán, 1988).

Asimismo, el Centro internacional de investigaciones sobre el cáncer (International Agency For Research On Cancer, 2002) basandose en estudios epidemiológicos a descrito un efecto crónico tras la exposición asociado a algunos tipos de cáncer particularmente leucemia infantil y tumores cerebrales. Sin embargo, y a pesar de la gran cantidad de estudios, los efectos de los CEM sobre la salud humana son aún controversiales y los mecanismos subyacentes no son aún claros (Yan, Don, Zhang, & Qi, 2010).

Para demostrar la existencia de efectos sobre la salud de las personas es esencial realizar un conjunto de estudios en distintos campos de investigación, los cuales se centran en estudiar diversos aspectos del problema. Entre los principales se pueden señalar los estudios in vitro que se realizan sobre células, los estudios in vivo realizados sobre animales, los estudios epidemiológicos realizados sobre poblaciones en seres humanos (Cruz, 2016).

En este contexto, diversos grupos de investigación buscan enmarcar el impacto, así como la especificidad del daño que pueden generar los CEM-ELF, diseñando sistemas in vitro para la exposición de cultivos celulares (Guangying et al, 2015).

Por tanto, el presente trabajo de tesis tuvo como objetivo el diseño e implementación de un sistema de exposición in vitro a campo magnético de frecuencia extremadamente baja, este equipo al ser el primero en el Perú contribuirá al desarrollo de futuras investigaciones biológicas a nivel celular.

Justificación

Justificación teórica

Desde el punto de vista teórico esta investigación busca ayudar a conocer mejor los posibles efectos en la salud de los seres humanos que están expuestos a los campos electromagnéticos producidos por las líneas de energía eléctrica. De este modo se pretende poder contribuir a la discusión con otros estudios realizados bajo circunstancias similares.

Justificación práctica

Desde el punto de vista práctico esta investigación no ha sido efectuada anteriormente en nuestro país es así que al término de este trabajo se podrá realizar los primeros estudios in vitro bajo la exposición a campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas, para poder responder muchas interrogantes que en la actualidad generan cierto temor y suspicacia por las personas que viven cerca de una línea eléctrica de alta tensión. En el caso de demostrar que dicha exposición no ocasiona problema alguno para la salud según la

evidencia científica concluyente de estos estudios, podría contribuir al desarrollo de nuevas redes de energía eléctrica que tanta falta le hace a nuestro país.

Es decir, el presente trabajo de tesis se justifica desde el punto de vista teórico y práctico.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas automatizados y controlados electrónicamente.

Objetivos específicos

Entre los objetivos específicos del presente proyecto de tesis se han evaluado los siguientes puntos, de los cuales tenemos:

- ❖ Revisar el estado del arte de los sistemas de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas.
- ❖ Diseñar el sistema de exposición.
- ❖ Implementar el sistema de exposición.
- ❖ Diseñar el generador de funciones arbitrarias
- ❖ Implementar el generador de funciones arbitrarias
- ❖ Realizar las pruebas de operación del sistema de exposición.

Capítulo 2

Marco teórico

Antecedentes

Jones, R-A. & Sheppard, A-R. (1992) los estudios a largo plazo de los efectos de campos magnéticos de baja frecuencia en células en cultivo requieren una incubadora que esté libre de campos magnéticos contaminantes y que proporcione control automático de la duración de la exposición, campos uniformes aplicados, una temperatura ambiental uniforme y bien controlada y Alta fiabilidad del sistema total. Describimos un sistema de doble incubadora en el que el solenoide cerrado de cualquiera de las unidades puede proporcionar una exposición ficticia mientras que el otro genera una inducción magnética de hasta 500 μ T. Cada unidad de incubadora de solenoide contiene una rejilla cerrada que puede contener hasta 140 placas de Petri para cultivar células; cada unidad se calienta radiante por la circulación de agua caliente. Las condiciones de exposición de campo y las temperaturas son supervisadas y controladas continuamente por un microordenador

Misakian, M., Sheppard, A-R., Krause, D., Frazier, M-E., & Miller, DL. (1993) su trabajo consistió en presenta un material destinado a ayudar a los investigadores a identificar y controlar una serie de parámetros biológicos, eléctricos y otros parámetros físicos que pueden afectar el resultado de estudios in vitro con campos magnéticos y eléctricos de baja frecuencia (ELF). Se proporcionan breves descripciones de los campos magnéticos y eléctricos de la línea eléctrica y se estudian métodos para la generación de 60 Hz, así como otros campos ELF en el laboratorio. También se describen métodos para calcular y medir parámetros de exposición en medio de cultivo. Relación in vitro y las condiciones de exposición in vivo interno a través de diferentes especies animales se discute para ayudar a los investigadores en la selección de los niveles de exposición al campo. El texto es a propósito elemental, y a veces breve, con las referencias proporcionadas para ayudar al lector

interesado a obtener una comprensión más completa de los muchos asuntos. Debido a que el rango de parámetros experimentales que pueden influir en el resultado de los estudios in vitro con campos ELF es tan amplio, normalmente se requiere un enfoque multidisciplinario para llevar a cabo la investigación.

Mullins, R-D., Siskin, J-E., Hejase, H-A., & Siskin, B-F. (1993) describieron un sistema que es capaz de producir campos magnéticos de frecuencia extremadamente baja (ELF) para exposición a relativamente corto plazo de células de mamífero cultivadas. El sistema utiliza un núcleo ferromagnético para contener y dirigir el campo magnético de una bobina solenoidal de 1.000 vueltas y puede producir una gama de densidades de flujo y campos eléctricos inducidos mucho más altos que los producidos por las bobinas de Helmholtz. El sistema puede generar campos magnéticos desde el rango de microtesla (uT) hasta 0,14 T con intensidades de campo eléctrico inducidas del orden de 1.0 V/m. El campo eléctrico inducido se puede variar exactamente cambiando la configuración de la cámara de muestra sin cambiar el campo magnético de la exposición. Esto da al sistema la capacidad de separar los bioefectos de campos eléctricos magnéticos e inducidos. En la gama de frecuencias de 4-100 Hz y el rango de densidad de flujo magnético de 0,005-0,14 T, la distorsión armónica total máxima del campo eléctrico inducido es típicamente inferior al 1,0%. La temperatura de las muestras se mantiene constante a 0,4 grados C por perfusión constante de medio de cultivo calentado a través de la cámara de muestra.

Wilson, B-W., et al. (1994) para determinar rigurosamente los efectos biológicos de los campos magnéticos débiles se necesitan sistemas de exposición que proporcionen una buena uniformidad de campo magnético, campos de dispersión mínimos y un mínimo calentamiento, vibración y zumbido, así como capacidad para una verdadera exposición ficticia en la que fluye la corriente en las bobinas. Se emplearon diseños basados en estructuras de soporte de bobinas de polímero acrílico y devanados bifilares de par trenzado

para fabricar varios sistemas diferentes para la exposición de animales de laboratorio y cultivos celulares a campos magnéticos. Estos sistemas presentan excelentes características de rendimiento en términos de uniformidad de campo de exposición, contención de campo disperso y cancelación de campo de exposición en el modo de exposición ficticia. Se utilizó un programa informático personalizado para determinar la mejor disposición para bobinas con respecto a la uniformidad de campo en el volumen de exposición y la contención de campo extraviado. Para las exposiciones in vivo, los módulos estaban formados por cuatro conjuntos de cuatro bobinas de Merritt, contruidos en una estructura única y situados para formar un octa-polo con campos dirigidos en el plano horizontal. Para aplicaciones in vitro, se seleccionaron dos configuraciones de bobina diferentes para producir los campos verticales requeridos. Se construyó como prototipo un sistema cuadrupolar, compuesto de dos conjuntos de cuatro bobinas Merritt dispuestos uno al lado del otro para limitar los campos perdidos. En la segunda configuración, un conjunto de cuatro bobinas de Merritt se colocó dentro del otro para formar un conjunto de bobinas concéntricas. En ambos sistemas in vitro, las cámaras de exposición se conectaron a incubadoras comerciales remotas para reducir los campos magnéticos ambientales en el volumen de exposición. Se desarrolló un circuito de cancelación de campo activo para reducir los campos magnéticos AC ambientales en la cámara de exposición ficticia in vitro, cuando era necesario. Estos enfoques de diseño y fabricación proporcionan sistemas que ofrecen exposiciones de campo uniformes y excelente contención de campo extraviado cuando son necesarios y son portátiles, lavables y relativamente baratos.

Yamazaki, K., Fujinami, H., Shigemitsu, T., & Nishimura, I. (2000) desarrollaron un centro de exposición para una amplia aplicación a la exposición de células a un campo magnético ELF (frecuencia extremadamente baja). Es adecuado para la realización de experimentos bajo un campo magnético de alta intensidad, de frecuencia variable, sobre los efectos biológicos

del campo magnético ELF en un estudio in vitro. El sistema de exposición consiste en la bobina 4-cuadrado de Merritt como un componente básico para generar la intensidad de campo magnético requerido de 10 mT a 50 Hz con uniformidad de campo espacial de menos de $\pm 3\%$ en un cubo de 400 mm. Se adoptan bobinas de compensación concéntricas para eliminar los efectos de los campos dispersos en muestras falsas (control) en las inmediaciones del sistema de exposición. Se investigó cuidadosamente la uniformidad del campo magnético en la bobina de exposición, el aumento de la capacidad de la fuente de alimentación debido a la existencia de bobinas de compensación y la estimación del campo disperso. Después de fabricar el sistema, se realizaron pruebas de rendimiento y todas las características se encontraron satisfactorias. Además, se propuso la configuración ideal para un sistema de bobinas concéntricas.

Rudolf Schuderers, J. (2003) diseñó e implementó un sistema de exposición programable de alta precisión que permite exposiciones ciegas. Se basa en dos sistemas blindados de 4 bobinas, que encajan dentro de una incubadora comercial. El volumen de exposición uniforme del campo B (desviación estándar: $< 1\%$) 3500cm^3 , que es considerablemente mayor en comparación con un sistema Merrit de 4 bobinas con el mismo volumen de bobina. Se ha especificado que las incertidumbres para los campos magnéticos aplicados son inferiores al 5%. La configuración controlada por ordenador permite formas de onda de señal que están compuestas de varios armónicos, protocolos ciegos, supervisión de la exposición y condiciones ambientales y la aplicación de campos B hasta 3.6 mT_{rms} . Las fuentes de los artefactos se han caracterizado por completo: aislamiento simulado $> 43\text{ dB}$, campos E de incidencia parasitaria $< 1\text{ V/m}$, diferencias de temperatura no reconocibles en el medio de exposición o en estado ficticio y vibraciones del portacuchillas mecánicamente desacoplado $< 0,1\text{ m/s}^2$, que es sólo el doble del nivel de fondo de aceleración simulado producido por las vibraciones de la incubadora y del ventilador.

Gottardi, G., Mesirca, P., Agostini, C., Remondini, D., & Bersani, F. (2003) propusieron un sistema de exposición de campo magnético (cuatro bobinas) para experimentos *in vitro* e *in vivo*, compuesto de dos parejas de bobinas circulares que satisfacen una restricción esférica, cuyas características se eligen para maximizar la región de uniformidad del campo magnético. Los cálculos analíticos y las simulaciones computarizadas muestran que nuestro sistema, en comparación con los otros sistemas de exposición de campos magnéticos más utilizados, representa un compromiso óptimo en términos de uniformidad de campo, accesibilidad para experimentos biológicos y relación entre la dimensión global y la región de uniformidad.

Cardelli, E. Faba, A., Palotti, N., Pompei, M., & Tissi, F. (2011) este trabajo trata sobre el diseño y la verificación experimental de dos sistemas de exposición de campos magnéticos distintos para aplicaciones relacionadas respectivamente con el análisis *in vivo* e *in vitro* de los efectos del campo magnético en ELF de frecuencia extremadamente baja. Las prestaciones de los dos sistemas en cuanto a la uniformidad de la exposición, la inducción magnética y el rango de frecuencia se discuten en el documento, y se verifican con una serie dedicada de pruebas experimentales. Finalmente se proporciona información sobre el nivel de aumento de temperatura y vibración esperada y su control para mostrar la capacidad de los sistemas de exposición presentados para ser instrumentos eficientes para estudios de exposición magnética de ELF no afectados por artefactos típicos producidos por este tipo de parásitos mecánicos Efectos.

Sismanidou, C., Reniers, A. C. F., & Zwamborn, A. P. M. (2011) en cuanto a los estudios biológicos *in vitro*, es necesario que se utilice un sistema de exposición bien caracterizado para validar y replicar los hallazgos clave. Por lo tanto, mejoramos y caracterizamos un sistema de exposición de campo magnético ELF con alto rango de exposición dinámica (μT -mT) y campos magnéticos dispersos reducidos para una señal

sinusoidal de 50/60 Hz. El diseño básico se basa en una configuración de doble solenoide. El solenoide exterior se utiliza para la reducción de las densidades de flujo disperso de B. El propio sistema es modular para adaptarse a diferentes experimentos biológicos. Para poder aplicar un alto rango de exposición dinámica se agrega un sistema de enfriamiento de aire controlado. El sistema de exposición está utilizando un algoritmo de control y una interfaz gráfica de usuario asociada. La temperatura se mide y se controla dentro del área de exposición. Las características de exposición junto con la variación de temperatura se controlan y registran durante los experimentos. En conclusión, el sistema de exposición ELF es muy adecuado para llevar a cabo una amplia gama de estudios de exposición celular a campos magnéticos ELF real y ficticia.

Base Teórica

Ondas electromagnéticas y sus principales características

Se llama ondas electromagnéticas (OEM) a la excitación simultánea de los campos eléctricos y magnéticos en un mismo espacio también podemos definirla como aquellas que no necesitan un medio material para propagarse. Estas ondas se propagan en el vacío teniendo una velocidad constante de 3×10^8 m/s, comunmente llamada velocidad de la luz (c). Entre estas ondas electromagnéticas podemos encontrar a la luz visible, las ondas de radio y televisión, la telefonía móvil, ondas de microondas, rayos x, etc.

Los campos electromagnéticos (CEM) están constituidos por un campo eléctrico y un campo magnético, los cuales son perpendiculares a la dirección de propagación y se encuentran en fase como se muestra en la Figura 1.

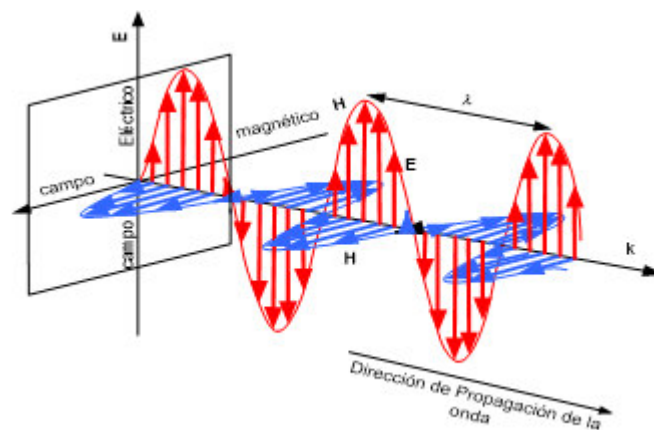


Figura 1. Diagrama esquemático de los campos electromagnéticos

Fuente: Cruz, 2016, p. 23

El campo eléctrico es producido por la atracción y repulsión de cargas eléctricas y su unidad fundamental de medida es el Voltios por metro (V/m), mientras que el campo magnético es producido por el movimiento de cargas eléctricas (corriente eléctrica) y su unidad fundamental de medida es el Gauss (G) o Tesla (T).

La frecuencia se define como el número de oscilaciones que pasan a través de un punto en una unidad de tiempo, se expresa en Hercios (Hz).

La longitud de onda λ o periodo se define como la separación entre crestas o valles de una onda electromagnética y se expresa en metros (m). Como se aprecia en la ecuación se puede relacionar la frecuencia y la longitud de onda de la siguiente manera:

$$\lambda = v/f$$

Donde:

λ : la longitud de onda.

v : velocidad de propagación, que es igual a la velocidad de la luz (c) en el vacío o en el aire ($c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ en el aire).

f : frecuencia.

La amplitud se define como la altura de una oscilación. En el rango de campos electromagnéticos se clasifican de la siguiente forma:

- La intensidad del campo eléctrico (V/m) para el campo eléctrico
- La intensidad del campo magnético (A/m) o en la materia la densidad del flujo magnético (T) para el campo magnético
- La densidad de flujo de potencia (W/m^2) para el campo electromagnético.

El Hertz es la unidad de medida de la frecuencia de las ondas y corresponde a un ciclo por segundo.

Cuando las frecuencias de las ondas de campo electromagnético provenientes de las redes de energía eléctrica atraviesan el material biológico, su velocidad se reduce y su longitud de onda llega a ser más pequeña que en el aire (Cruz, 2016, p. 23).

El espectro electromagnético es la asignación energética del conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas en función de la frecuencia (longitud de onda). En la Figura 2 se observa de manera resumida el espectro electromagnético, este se puede dividir en grandes grupos como: radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos x y rayos gamma.

Como se mencionó anteriormente todos estos grupos se diferencian entre sí en función de su frecuencia, la cual viene a ser el número de pulsos de una señal que se repite por segundo y es la característica fundamental que identifica a una onda electromagnética.

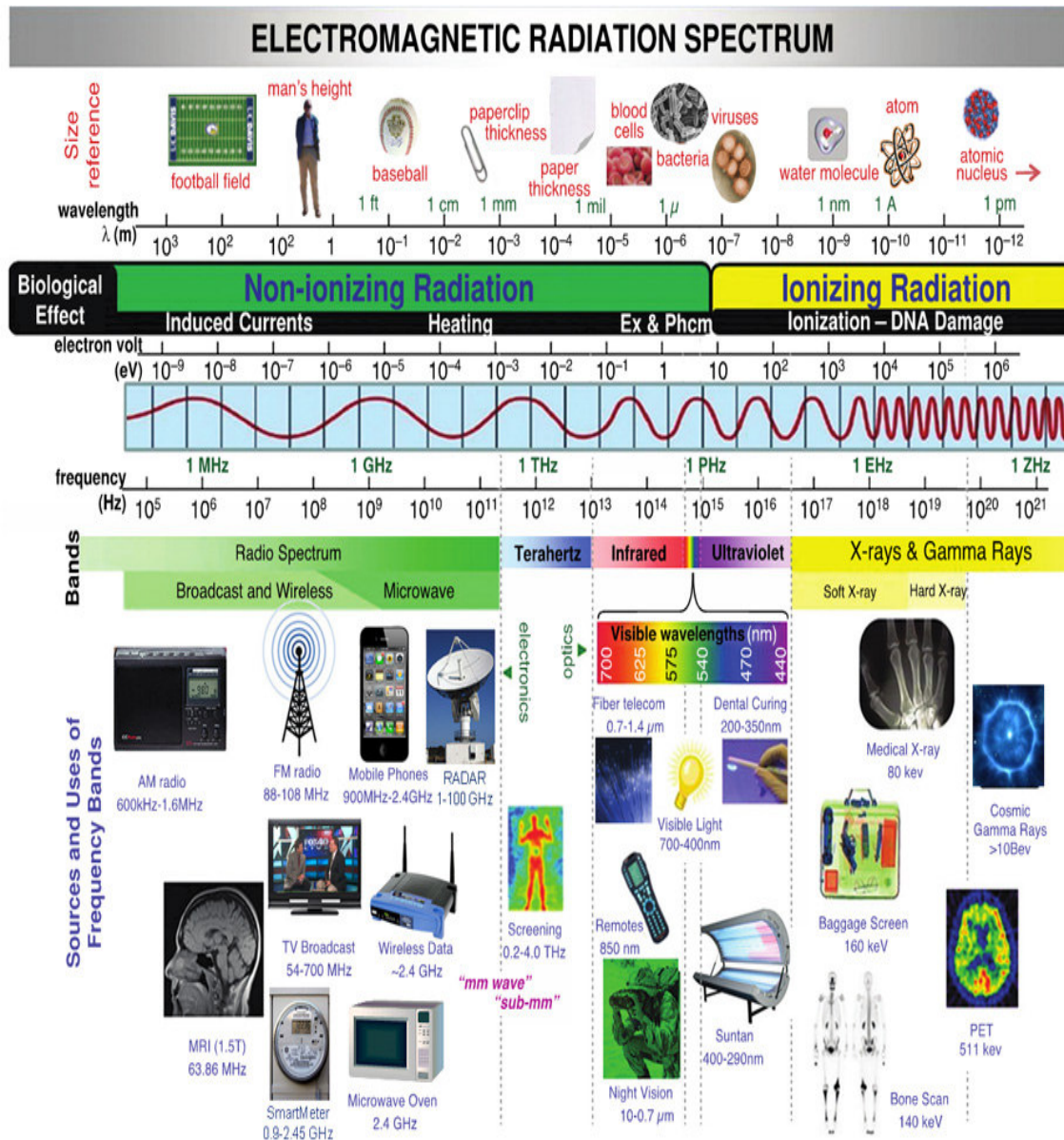


Figura 2. Espectro electromagnético.

Fuente: Actualidad informática (2011)

También podemos caracterizarlas mediante su longitud de onda, que es la separación entre dos crestas o valles de la misma amplitud o altura de oscilación. Cada longitud de onda es un color, no obstante, las mayores porciones de ellos son invisibles para el ojo humano.

Las ondas electromagnéticas atenúan su energía conforme se mueven, alejándose de las fuentes donde son producidas, es decir una persona recibirá menos exposición cuanto más lejos se encuentre de una línea de energía eléctrica o de cualquier otra fuente de energía electromagnética (Cruz, 2005, p. 7).

La radiación de las ondas electromagnéticas puede ser clasificada en radiaciones no ionizantes y radiaciones ionizantes.

Radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes, son ondas electromagnéticas de frecuencias altas y longitudes de ondas muy cortas que poseen suficiente energía para que se realice el proceso de ionización es decir los electrones son arrancados de las moléculas o átomos.

Su interacción con la materia provoca cambios químicos en los tejidos y daña el ADN. Esto aumenta el riesgo de padecer de ciertas afecciones, como el cáncer. Esta radiación proviene de fuentes naturales como los rayos cósmicos y de aparatos de imágenes médicas, como las máquinas de radiografía y de tomografía. Es posible que la exposición a dosis muy altas de esta radiación provoque daños inmediatos en el cuerpo, que incluyen daños graves en la piel o los tejidos, enfermedad aguda por radiación y muerte (National Cancer Institute, 2018).

Radiación No Ionizante

Las radiaciones no ionizante (RNI) son aquellas ondas electromagnéticas de baja y media frecuencia y longitudes de onda muy largas que no tienen suficiente energía en sus fotones para causar ionización en átomos y moléculas, las podemos encontrar en el rango de frecuencia de 0 Hz hasta aproximadamente $3 \times 10^{15}\text{ Hz}$, en este intervalo la energía del fotón iguala a $2 \times 10^{-18}\text{ J}$ ó 12.4 eV y se hace comparable a la energía de enlace de los electrones con los átomos, por lo que antes de esa frecuencia, las ondas electromagnéticas no tienen la suficiente energía como para romper los enlaces atómicos (Cruz, 2006, p. 36).

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2015), las radiaciones no ionizantes de las ondas electromagnéticas se clasifican de la siguiente forma:

Campos estáticos 0 Hz.

Son campos que no cambian en dirección o intensidad en el tiempo (dispositivos de resonancia magnética).

Campos de frecuencia bajas 1 Hz - 300 Hz.

Son campos eléctricos y magnéticos que varían en el tiempo. Está conformado por un campo eléctrico debido a una carga eléctrica y un campo magnético. (aparatos eléctricos, dispositivos electrónicos, líneas eléctricas, entre otros).

Campos de frecuencia intermedia 300 Hz-10 MHz.

Producen efectos térmicos e inducen a excitaciones nerviosas y musculares (transmisores de radio AM, sistemas antirrobo, sistemas de seguridad, pantallas de ordenador).

Campos de alta frecuencia o radiofrecuencia 10 MHz-300 GHz.

La exposición se mide en vatios por metro cuadrado ($\frac{W}{m^2}$). Ejerce cierto calentamiento sobre el tejido expuesto, puede causar cierta vibración sobre las moléculas del cuerpo humano y por lo tanto producir calor. Se utilizan en su mayoría con fines de comunicación (teléfonos móviles, Wi-fi, bluetooth, televisión, radios, estaciones base, dispositivos de seguridad, hornos microondas y en medicina como equipos de resonancia magnética).

Regiones de propagación.

Al propagarse las ondas electromagnéticas en el espacio libre a partir de una fuente radiante generan campos electromagnéticos que se relacionan entre sí de forma diferente a lo largo de su propagación.

En la Figura 3 se presenta las regiones de campo de acuerdo a la Recomendación UIT K.61.

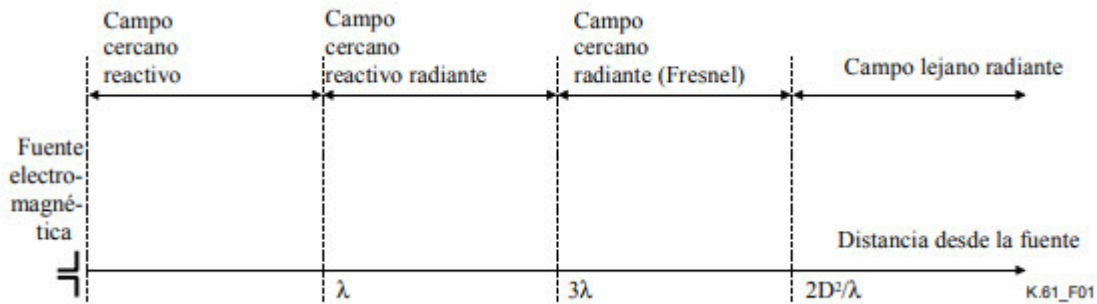


Figura 3. Regiones de campo en torno a la fuente EM (se supone que la máxima dimensión de la antena D es grande comparada con la longitud de onda λ).

Fuente: UIT K.61 (2018)

Campo cercano.

El campo cercano o región de Fresnel generalmente se encuentra situada en las proximidades de una antena u otra estructura radiante en la que los campos eléctricos y magnéticos no son sustancialmente de tipo onda plana, es decir los campos E y H no son necesariamente perpendiculares y están desacoplados. Esta región se subdivide en la región de campo cercano reactivo, más cercana a la fuente radiante y que contiene casi la totalidad de la energía almacenada, y la región de campo cercano radiante, en la que el campo de radiación predomina sobre el campo reactivo. (UIT, 2011).

Los campos cercanos varían rápidamente en el espacio y la evaluación de su propagación es complicada ya que los máximos y mínimos de los campos E y H no ocurren en los mismos puntos a lo largo de la dirección de propagación (Cruz, 2006, p. 33).

Esta región existe únicamente si la máxima dimensión D de la antena es grande en comparación con la longitud de onda λ (UIT, 2018).

Campo lejano.

Región del campo donde la distribución de campo angular es fundamentalmente independiente de la distancia desde la antena y la densidad de potencia radiada ($\frac{W}{m^2}$) es constante. La frontera interior de la región de campo lejano radiante viene determinada por el mayor valor entre 3λ y $\frac{2D^2}{\lambda}$ (el límite es $\frac{2D^2}{\lambda}$ si la máxima dimensión D de la antena es grande

en comparación con la longitud de onda). En la región de campo lejano las componentes del campo son transversales y se propagan como una onda plana (UIT, 2018).

En la región de campo lejano:

- Los vectores E y H y la dirección de propagación son mutuamente perpendiculares.
- La fase de los campos E y H son las mismas, y el cociente de las amplitudes $\frac{E}{H}$ es constante a través del espacio. En espacio libre, la relación $Z_0 = \frac{E}{H} = 377 \text{ ohmios}$, y es conocida como impedancia característica del espacio libre.
- La densidad de potencia de la onda en el eje de propagación, es decir la potencia por unidad de área normal a la dirección de propagación, está relacionada a los campos eléctricos y magnéticos por la expresión: $S = E * H = \frac{E^2}{377} = H^2 * 377$ (Cruz, 2006, p. 35).

Campos electromagnéticos de frecuencias extremadamente bajas producidos por las redes de energía eléctrica

Los diferentes elementos de las redes de energía eléctrica como son las centrales de generación, las líneas de transmisión, las redes de distribución eléctrica y las aplicaciones industriales y domesticas generan campos electromagnéticos que a su vez pueden producir exposición sobre las personas (Cruz, 2016, p. 24). En la Figura 4 se observa los diferentes componentes de una red eléctrica.

Los campos electromagnéticos producidos por las líneas de alta tensión a nivel global trabajan generalmente a frecuencias de 50 o 60 Hz y en el caso de nuestro país la frecuencia adoptada es de 60 Hz. Es por eso que podemos clasificar a las líneas eléctricas, aparatos eléctricos, dispositivos electrónicos, entre otros en el grupo de **frecuencias extremadamente bajas (ELF)**, este grupo de frecuencias producen campos electromagnéticos de denominación **(CEM-ELF)**.

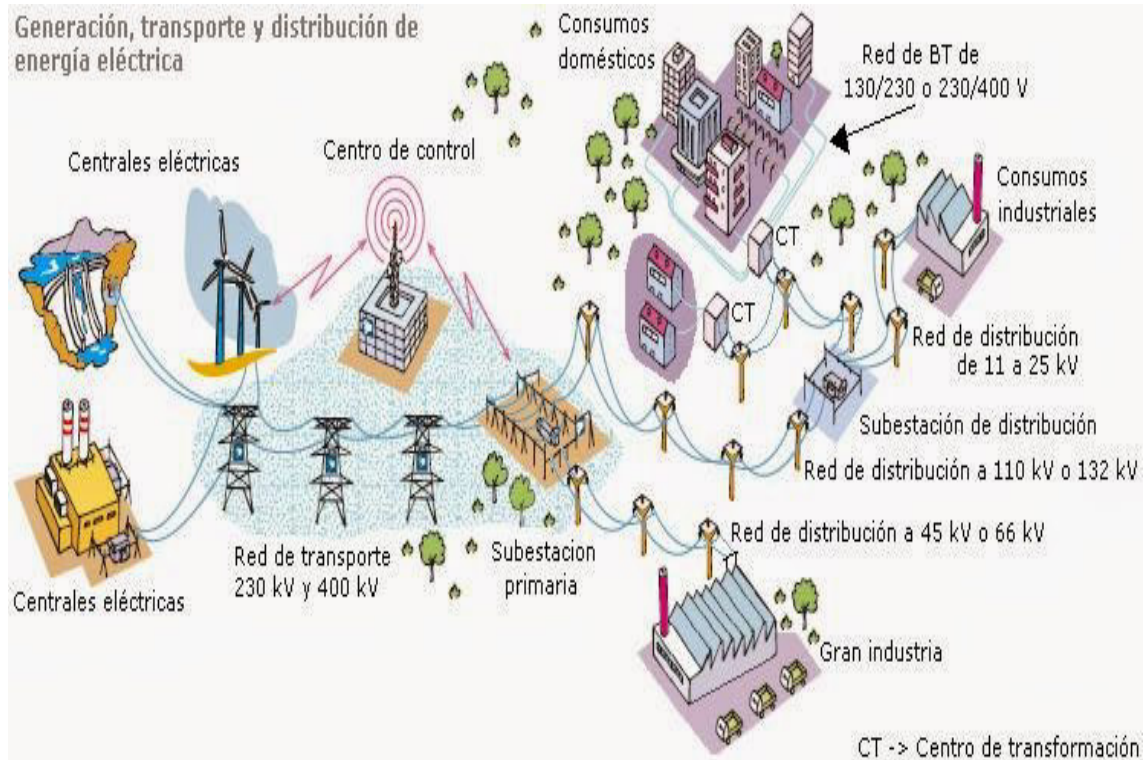


Figura 4. Distribución de la energía eléctrica y componentes generadores de CEM.
Fuente: Electro FY (2015)

Interacción de los campos electromagnéticos de extremadamente baja frecuencia con el cuerpo humano.

La interacción de los campos electromagnéticos y los sistemas biológicos se muestran de forma inherente en el cuerpo humano con las corrientes eléctricas, gracias a este fenómeno se comunican los impulsos nerviosos, se desarrollan los procesos bioquímicos que van desde la digestión hasta la actividad cerebral (Protégete del móvil, 2018).

Se sabe por los múltiples estudios realizados hasta la actualidad que la interacción de los campos electromagnéticos y el cuerpo humano debido a las líneas de energía eléctrica con frecuencia de operación a 50Hz o 60Hz, pertenecen a la región de propagación conocida como “campo cercano o región de Fresnel” es por ello que tanto el campo magnético como el campo eléctrico al propagarse en el espacio libre, no guardan ninguna linealidad, es decir se comportan de manera independiente uno respecto al otro.

En la Figura 5 se ilustra esquemáticamente la interacción entre los campos eléctricos y magnéticos con el cuerpo humano

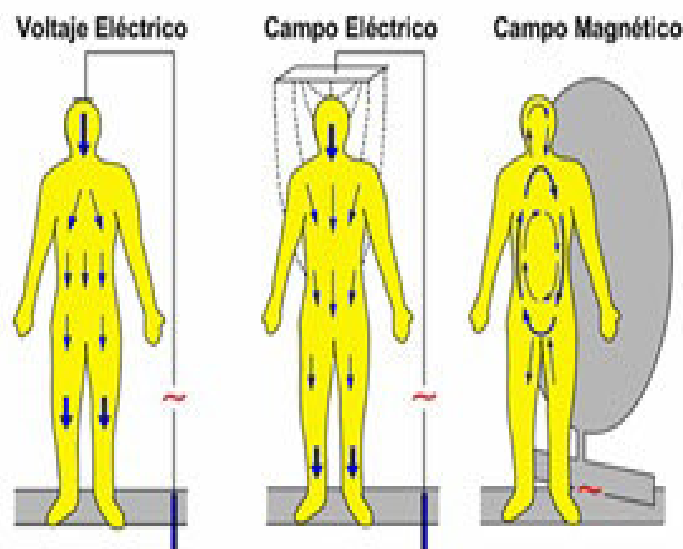


Figura 5. Interacción entre los campos eléctricos y magnéticos con el cuerpo humano.
Fuente: Cruz, 2016, p. 26

La radiación no ionizante producida por los campos electromagnéticos de extremadamente baja frecuencia (CEM-ELF) que se discute normalmente es la del campo magnético ya que este tiene la particularidad de penetrar los tejidos biológicos casi sin ninguna distorsión, dado que estos tejidos poseen una conductividad baja y su permeabilidad es prácticamente la misma que la del aire, por lo que se estima que los posibles efectos sobre la salud podrían provenir principalmente de la exposición a los campos magnéticos, dichos campos son producido por corrientes alternas o campos variantes en el tiempo cuya intensidad y dirección cambien de forma regular. Estos campos provienen principalmente de fuentes creadas por el hombre, especialmente de servicios de las líneas de energía eléctrica. Mientras que los campos eléctricos inducidos son muy bajos, aproximadamente 105 a 108 veces menores que los campos externos (Sáiz & Solano, s.f; Cruz, 2016).

En la Tabla 1 se muestran los valores de campo magnético producidos por los electrodomésticos más usados y por algunos elementos de la vivienda. Cabe mencionar que los valores obtenidos varían mucho con la configuración, la marca del aparato y el punto en el que se toma la medida (Grupo Pandora, 2001).

Tabla 1

Campo magnético en domicilios, medido en tres puntos diferentes.

Aparato	Campo magnético de 50/60 Hz (uT)		
	a 10 cm	a 30 cm	a 1m
Frigorífico	0.06	0.03	0.02
Afeitadora	0.24	0.01	0.01
Cocina eléctrica	0.29	0.11	0.03
Reloj despertador	0.59	0.23	0.03
Teléfono portátil	0.80	0.02	0.02
Tostadora	1.14	0.13	0.00
Secadora de pelo	1.34	0.20	0.01
Televisor	1.40	0.50	0.09
Freidora	1.70	0.08	0.01
Aire acondicionado	1.80	0.38	0.12
Picadora	2.84	0.33	0.04
Suelo radiante	3.01	0.38	0.02
Aspiradora	5.16	1.52	0.31
Lámpara halógena	10.64	1.42	0.14
Lavadora	16.82	9.52	2.76
Hornos de microondas	30.04	6.04	0.61

Nota: Tomado del Libro Campos eléctricos y magnéticos de 50Hz (Grupo Pandora, 2011, p.21).

En la Tabla 2 se muestran los valores de campo magnético producidos próximo a algunas máquinas en la mediana industria. Como en el caso de los domicilios, las medidas varían mucho con la marca y forma de las herramientas, así como con la posición en la que se coloca el medidor; en esta tabla se han incluido los puntos en los que el campo magnético era mayor (Grupo Pandora, 2001).

Tabla 2

Valores de campo magnético para algunos equipos de la mediana industria.

Aparato	Campo magnético de 50/60 Hz (uT)		
	a 10 cm	a 30 cm	a 1m
Pantalla de alumbrado	0.05	0.05	0.05
Taladro	0.13	0.09	0.03
Sierra	0.24	0.13	0.04
Torno	0.56	0.08	0,04
Cargador de baterías	1.42	0.31	0.02
Calentador de aire	2.52	0.30	0.13
Compresor	3.18	0.54	0.05
Taladro portátil	34.56	7.10	0.89
Montacargas	38.72	2.96	0.50
Piedra esmeril	56.32	10.24	0.98
Máquina de soldar	564.00	191.00	78.40

Nota: Tomado del Libro Campos eléctricos y magnéticos de 50Hz (Grupo Pandora, 2011, p.22).

Efectos sobre la Salud debido a la Exposición a Campos Electromagnéticos.

Diariamente los organismos, incluido el hombre, están expuestos a diferentes intensidades de campos magnéticos provenientes del medio ambiente. Muchos reportes sugieren un efecto negativo de estos sobre los sistemas biológicos, sin embargo, otros indican un efecto terapéutico en aplicaciones clínicas (Williams, Marcov, Hardman & Cameron, 2001). Este mismo panorama se ha venido presentando en los diversos estudios a lo largo de los años, es decir, los efectos de los campos magnéticos sobre la salud de las personas aún siguen siendo controversiales. Dentro de dicha premisa se toma en cuenta tanto el tiempo de exposición como los diferentes tipos de onda, la frecuencia o intensidad del campo, siendo la repercusión de aquellas con frecuencias extremadamente bajas (ELF), una de las más estudiadas. Por ejemplo, en cuanto a efectos agudos está establecido que los campos magnéticos ELF producen corrientes internas en el cuerpo que pueden estimular músculos como el corazón llegando a producir fibrilación ventricular (OMS, 2007).

La guía de ICNIRP 1998 se basa en los únicos efectos nocivos conocidos y comprobados de los campos eléctricos y magnéticos, que son los efectos a corto plazo (agudos) que se producen cuando la densidad de corriente inducida supera cierto valor umbral (Grupo Pandora, 2001). Los efectos se muestran en la Tabla 3. Esta tabla tiene carácter informativo y lo que se busca es mostrar la evolución de la clasificación de los efectos biológicos, ya que a la fecha es la guía ICNIRP 2010 la que se encuentra vigente, tal como se muestra en el Apéndice A.

Tabla 3

Efectos biológicos a corto plazo de la densidad de corriente inducida.

Densidad de corriente inducida	Efectos biológicos
< 1 mA/m ²	No hay efectos biológicos.
1 – 10 mA/m ²	Efectos biológicos mínimos, no significativos.
10 – 100 mA/m ²	Posibles efectos sobre el sistema visual (fosfenos) y el sistema nervioso (pequeñas contracciones musculares), sin riesgos para la salud.
100 – 1000 mA/m ²	Estimulación de tejidos excitables, por ejemplo nervios o músculos (contracciones musculares y arritmias), con posibles riesgos para la salud.
> 1000 mA/m ²	Posibles extrasístoles y fibrilación ventricular, con riesgos comprobados para la salud.

Nota: Tomado del Libro Campos eléctricos y magnéticos de 50Hz (Grupo Pandora, 2011, p.33).

Sin embargo, en lo referente a efectos debidos a exposición crónica estos campos han sido clasificados como cancerígenos 2B debido a los resultados de muchos estudios epidemiológicos que demuestran la duplicación de la incidencia de leucemia infantil para exposiciones crónicas mayores a 0.4 uT (IARC, 2002), por lo que es necesario realizar más estudios que permitan dilucidar los efectos.

Asimismo, existen una variedad de estudios epidemiológicos sobre líneas eléctricas y su relación con la leucemia infantil como por ejemplo los que se muestran en la Tabla 4 debido a que no se ha podido demostrar la causalidad, estos hallazgos no tienen la condición de efecto establecido.

Tabla 4

Estudios epidemiológicos sobre líneas eléctricas y leucemia infantil.

Autor principal (país, año)	Método de cálculo de la exposición	Número de casos expuestos	Riesgo (Intervalo de confianza al 95%)
Wertheimer y Leeper (EE.UU. 1979)	Código de cables	n=52	2,3 (1,3-3,9)
Fulton (EE.UU. 1980)	Código de cables	n=48	1,1 (0,6-1,9)
Tomenius (Suecia, 1986)	Medida puntual >0,3 µT	n=4	0,3 (0,1-1,1)
	Distancia <150 m	n=5	1,1 (0,3 - 4,6)
Savitz (EE.UU., 1988)	Código de cables	n = 27	1,5 (0,9-2,6)
	Medida puntual >0,2 µT	n = 5	1,9 (0,7-5,6)
	Medida 24 h. >0,268 µT	n = 20	1,7 (0,8 - 3,7)
Coleman (U.K. 1989)	Distancia <50 m	n = 14	1,5 (0,7-3,4)
Lin (Taiwán, 1989 y 1994)	Distancia	n = 67	1,5 (1,1-1,9)
Myers (U.K.1990)	Distancia <100 m	n = 18	1,0 (0,5-2,2)
London (EE.UU., 1991)	Código de cables	n = 42	2,1 (1,08-4,3)
	Campo medido >0,12 µT	n = 16	1,2 (0,5-2,8)
	Campo calculado		
Feychting y Ahlbom (Suecia, 1993)	>0,2 µT	n = 7	2,7 (1,0-6,3)
	>0,3 µT	n = 7	3,8 (1,4-9,3)
	Campo medido >0,2 µT	n = 4	0,6 (0,2-1,8)
	Distancia <50 m	n = 6	2,9 (1,0-7,3)
Olsen (Dinamarca, 1993)	Campo calculado >0,25 µT	n = 3	1,5 (0,3-6,7)
Verkasalo (Finlandia, 1993)	Campo calculado >0,2 µT	n = 3	1,6 (0,3-4,5)
Fajardo-Gutiérrez (Méjico, 1993)	Distancia: a líneas de distribución	n = 40	2,6 (1,2-5,3)
	a líneas de transporte	n = 20	2,5 (0,9-6,6)
Petridou (Grecia, 1993)	Distancia <50m	n = 27	1,2 (0,6-2,4)
	Exposición promediada en el tiempo (TWA) >0,14 µT	n = 1	0,3 (0,0-2,1)
Tynes (Noruega, 1997)	Distancia <50 m	n = 9	0,6 (0,3-1,3)
	Campo calculado		
	>0,14 µT	n = 4	0,8 (0,3-2,4)
	>0,2 µT	n = 2	0,5 (0,1-2,2)
	Media campo medido en dormitorio durante 24 h >0,2 µT	n = 4	1,5 (0,4-5,5)
Michaelis (Alemania, 1997)	Mediana campo medido por la noche >0,2 uT	n = 5	3,9 (0,9-16,9)
		n = 3	0,9 (0,2-3,6)

Nota: Tomado del Libro Campos eléctricos y magnéticos de 50Hz (Grupo Pandora, 2011, p.98).

Estudios in – vitro aplicados a los campos electromagnéticos

Los estudios in vitro son experimentos científicos llevado a cabo en laboratorio con material procedente de seres vivos (células aisladas, tejidos, etc.).

Entre los diferentes estudios realizados a la fecha se ha observado que la exposición de cultivos celulares in vitro a campos magnéticos pulsados de 0,5 Hz no afecta significativamente la capacidad de proliferación de una línea celular denominada células madre embrionarias humanas (Wu et al., 2014). Por otra parte, existe evidencia que se observa que algunos micro ácido ribonucleico pueden incrementarse e inhibir el crecimiento celular o incrementan la proliferación del ciclo celular, como ocurre en la línea celular de ratón GC-2 (Liu et al., 2015) y en células madre mesenquimales que estimulan la expresión de genes involucrados en la proliferación celular cuando células son expuestas a campos magnéticos pulsado (Jazayeri et al., 2016). Asimismo, se ha encontrado que el ciclo celular se ve afectado en las células en cultivo expuestas a campos magnéticos sinusoidal de 60 Hz, desencadenando apoptosis celular lo cual reduce el número de células cuando son expuestos embriones preimplantacionales de ratón In vitro (Luo et al., 2006).

Aunque hasta el momento no se ha encontrado ningún efecto biológicamente significativo por debajo de **200 μ T**; también se investiga la posibilidad de que estos campos pudieran afectar a la velocidad a la que se producen ciertas reacciones químicas (Grupo Pandora, 2001).

Los estudios de laboratorio sobre células, permiten dominar una inmensa cantidad de variables, por ejemplo, las condiciones reales de exposición a campos electromagnéticos. Los estudios epidemiológicos investigan lo que realmente interesa, la salud de las personas en su ambiente cotidiano, pero tienen como principal defecto que en la mayoría de los casos no se conocen bien los niveles de campo electromagnético a los que han podido estar expuestos los participantes en el estudio (Grupo Pandora, 2001).

Límites de Exposición a Campos Magnéticos de Frecuencias Extremadamente Bajas (ELF)

Normativa Internacional

La recomendación ICNIRP 1998

La Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) es una organización no gubernamental, científica e independiente creada en el año de 1992 por la Asociación Internacional de Protección contra la Radiación (IRPA), incentiva a la protección contra las radiaciones no ionizantes (RNI) en beneficio de las personas y del medio ambiente (OMS, 2018). Ha sido reconocido formalmente por la OMS (Organización Mundial de la Salud), la OIT (Organización Internacional del Trabajo) y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT).

En el año 1998 ICNIRP publica las “*Recomendaciones ICNIRP para Limitar la Exposición a Campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos (hasta 300 GHz)*” (ICNIRP, 1998) la cual incluye los límites de exposición para frecuencias extremadamente bajas (ELF) hasta radiofrecuencias (RF).

Mientras la última actualización para frecuencias bajas fue publicada en el 2010 con el título de “*Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos variables en el tiempo (1 Hz- 100 kHz)*” (ICNIRP, 2010).

Ambas recomendaciones se basan en los efectos biológicos establecidos que implican efectos sobre la salud y han sido adoptadas como sus estándares nacionales por más de 124 países en todo el mundo, pero en muchos casos solo para radiofrecuencias (Cruz, 2016., p.31).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) creó en 1996 el Proyecto Internacional CEM para evaluar las pruebas científicas de los posibles efectos sobre la salud de los CEM en el intervalo de frecuencia de 0 a 300 GHz (OMS, 2018).

Como parte de la gestión del riesgo de la exposición a campos electromagnéticos el Proyecto Internacional CEM viene incentivando los trabajos de investigación con la finalidad de dar respuestas concretas a los vacíos académicos que se tiene hasta la fecha y a promover la aceptación de estándares homogéneos a nivel mundial.

En el Perú se ha adoptado las recomendaciones ICNIRP para el rango de frecuencias de 1 Hz a 300GHz, esta recomendación básicamente se centra en los Límites Máximos Permisibles (LMP), es decir los niveles de exposición que no pueden ser superados en cualquier servicio que opere dentro de este ancho de banda.

A su vez se divide en dos grupos “niveles de exposición para público general” como se muestra en la Tabla 5 y “niveles de exposición ocupacional” los cuales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 5

Niveles de referencia para la exposición para público general a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (valores eficaces rms).

Rango de frecuencia	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de flujo magnético (μT)	Densidad de potencia (W/m ²)
Hasta 1 Hz	-	3.2×10^4	4×10^4	-
1 – 8 Hz	10000	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8 – 25 Hz	10000	$4000/f$	$5000/f$	-
0.025 – 0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0.8 – 3 kHz	$250/f$	5	6.25	-
3 – 150 kHz	87	5	6.25	-
0.15 – 1 MHz	87	$0.73/f$	$0.92/f$	-
1 – 10 MHz	$87/f^{0.5}$	$0.73/f$	$0.92/f$	-
10 – 400 MHz	28	0.073	0.092	2
400 – 2000 MHz	$1.375 \times f^{0.5}$	$0.0037 \times f^{0.5}$	$0.0046 \times f^{0.5}$	$f/200$
2 – 300 GHz	61	0.16	0.20	10

Nota: Tomada de International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (1998). Los límites de exposición establecidos se refieren a las medias temporales y espaciales de las magnitudes indicadas. Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, Seq, E², H², y B², deben ser promediados sobre cualquier periodo de 6 minutos. Para frecuencias por encima de 10 GHz, Seq, E², H², y B², deben ser promediados sobre cualquier periodo de $68 / f^{1.05}$ minutos (f en GHz).

Tabla 6

Niveles de referencia para la exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo (valores eficaces rms).

Rango de frecuencia	Intensidad de campo eléctrico (V/m)	Intensidad de campo magnético (A/m)	Densidad de flujo magnético (μT)	Densidad de potencia (W/m ²)
Hasta 1 Hz	-	1.63×10^5	2×10^5	-
1 – 8 Hz	20000	$1.63 \times 10^5/f^2$	$2 \times 10^5/f^2$	-
8 – 25 Hz	20000	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^4/f$	-
0.025 – 0.82 kHz	500/f	20/f	25/f	-
0.82 – 65 kHz	610	24.4	30.7	-
0.065 – 1 MHz	610	1.6/f	2/f	-
1 – 10 MHz	610/f	1.6/f	2/f	-
10 – 400 MHz	61	0.16	0.2	10
400 – 2000 MHz	$3 \times f^{0.5}$	$0.008 \times f^{0.5}$	$0.01 \times f^{0.5}$	$f/40$
2 – 300 GHz	137	0.36	0.45	50

Nota: Tomada de International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (1998). El valor de la frecuencia “f” debe estar en las unidades que se indican en la columna de rango de frecuencias. Los límites de exposición establecidos se refieren a las medias temporales y espaciales de las magnitudes indicadas. Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, Seq, E², H², y B², deben ser promediados sobre cualquier periodo de 6 minutos. Para frecuencias por encima de 10 GHz, Seq, E², H², y B², deben ser promediados sobre cualquier periodo de $68 / f^{1.05}$ minutos (f en GHz).

Restricciones básicas para campos magnéticos de baja frecuencia

Entre 1 Hz y 10 MHz, las restricciones básicas están dadas en términos de la densidad de corriente, para prevenir daños funcionales en el sistema nervioso, tal como se muestra en la Tabla 7.

En el rango de frecuencia de unos pocos Hz a 1 kHz, para niveles de densidad de corriente inducida por encima de 100 mA/m^2 , los umbrales para cambios agudos en la excitabilidad del sistema nerviosos central y otros efectos agudos como la reversión del potencial evocado visualmente, son excedidos. En vista de las condiciones de seguridad ya mencionadas, se decidió que en el rango de las frecuencias de 4Hz a 1 kHz, la exposición ocupacional debería estar limitada a campos que induzcan densidades de corriente menores a

10 mA/m², es decir para usar un factor de seguridad de 10. Para el público en general un factor adicional de 5 es aplicado, dando una restricción básica de la exposición de 2 mA/m². Por debajo de 4 Hz y por encima de 1 kHz, la restricción básica basada en la densidad de corriente inducida se incrementa progresivamente, correspondiendo al incremento del umbral para la estimulación de los nervios para estos rangos de frecuencia (ICNIRP, 1998).

Tabla 7

Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias hasta 10GHz

Características de la exposición	Rango de Frecuencias	Densidad de Corriente para cabeza y tronco (mA/m ²) (rms)	SAR promedio en todo el cuerpo (W/kg)	SAR localizado cabeza y tronco (W/kg)	SAR localizado (extremidades) (W/kg)
Exposición ocupacional	Hasta 1 Hz	40	-	-	-
	1 – 4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz – 1k Hz	10	-	-	-
	1 – 100k Hz	f/100	-	-	-
	100 kHz – 10M Hz	f/100	0.4	10	20
	10M Hz – 10G Hz	-	0.4	10	20
Exposición poblacional	Hasta 1 Hz	8	-	-	-
	1 – 4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz – 1k Hz	2	-	-	-
	1 – 100k Hz	f/500	-	-	-
	100 kHz – 10M Hz	f/500	0.08	2	4
	10M Hz – 10G Hz	-	0.08	2	4

Nota: Tomada de International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (1998). *f* es la frecuencia en Hz. Debido a que el cuerpo humano no es eléctricamente homogéneo, las densidades de corriente deberían ser promediadas sobre una sección transversal de 1 cm², perpendicular a la dirección de la corriente. Para frecuencias hasta 100 kHz, los valores de la densidad de corriente pico pueden obtenerse multiplicando el valor rms (de la Tabla 7) por 1,414. Para pulsos de duración *t_p*, la frecuencia equivalente a aplicarse en las restricciones básicas debería ser calculado según: $= 1/(2t_p)$. Para frecuencias hasta 100 kHz y para campos magnéticos pulsantes, la densidad de corriente máxima asociada con los pulsos puede ser calculada de los tiempos de subida / bajada y la máxima tasa de cambio de la densidad de flujo magnético. Luego la densidad de corriente inducida puede ser comparada con la restricción básica apropiada. Todos los valores del SAR, deben ser promediados sobre cualquier periodo de 6 minutos. 6. La masa para promediar el SAR localizado es cualquier de tejido contiguo de 10 g de masa; el máximo SAR así obtenido debería ser el valor usado para la estimación de la exposición. Para pulsos de duración *t_p*, la frecuencia equivalente a aplicarse en las restricciones básicas debería ser calculado según: $= 1/(2t_p)$. Adicionalmente en el rango de frecuencias de 0,3 a 10 GHz y para exposición localizada en la cabeza, con el objeto de evitar el efecto auditivo causado por la expansión termo elástica, se recomienda una restricción básica adicional. Esta restricción es que la SA promediada sobre 10 g de tejido no debe exceder 10 mJ/kg para trabajadores y 2 mJ/kg para el público en general.

Recomendaciones ICNIRP 2010

En 2010 la ICNIRP ha publicado nuevas directrices para los CEM con frecuencias comprendidas entre 1 Hz y 100 kHz, en este documento, se establecen pautas para la protección de humanos expuestos a campos eléctricos y magnéticos en el rango de baja frecuencia del espectro electromagnético (ICNIRP, 2010).

Teniendo un ligero cambio respecto a la recomendación ICNIRP 1998 ya que en esta nueva recomendación se cambian las restricciones básicas de la densidad de corriente a los campos internos.

Es decir, la Recomendación ICNIRP 2010 reemplaza la parte correspondiente a los campos electromagnéticos de bajas frecuencias.

Restricciones Básicas ICNIRP 2010

Como en las Recomendaciones ICNIRP 1998, a partir de los efectos establecidos con un factor de seguridad de 10 se obtienen las restricciones básicas ocupacionales y con un factor de seguridad adicional se obtienen las restricciones básicas para el público en general (Cruz, p. 32, 2016), estos se presentan en la Tabla 8.

Niveles de Referencia ICNIRP 2010

Los niveles de referencia para baja frecuencia (1 Hz y 100 kHz) son obtenidos mediante el uso de modelos matemáticos y por extrapolación de los resultados de las investigaciones de laboratorio a frecuencias específicas (Cruz, p. 33, 2016).

En la Tabla 9 se presentan los niveles de referencias ocupacionales y poblacionales de las Recomendaciones ICNIRP 2010.

Tabla 8

Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias entre 1 Hz y 100 kHz (valores eficaces rms)

Características de la exposición	Tejido	Rango de Frecuencias	Campo eléctrico interno (V/m)
Ocupacional	Sistema Nervioso Central - Cabeza	1 - 10 Hz	0.5 /f
		10 Hz – 25 Hz	0.05
		25 Hz – 400 Hz	$2 \times 10^{-3}f$
		400 Hz – 3 kHz	0.8
		3 kHz – 100 kHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
	Todos los tejidos de la cabeza y el cuerpo	1 Hz – 3 kHz	0.8
Poblacional	Sistema Nervioso Central - Cabeza	3 kHz – 100 kHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
		1 - 10 Hz	0.1 /f
		10 Hz – 25 Hz	0.01
		25 Hz – 1000 Hz	$4 \times 10^{-4}f$
		1000 Hz – 3 kHz	0.4
	Todos los tejidos de la cabeza y el cuerpo	3 kHz – 100 kHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
		3 kHz – 100 kHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
		1 Hz – 3 kHz	0.4
		3 kHz – 100 kHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
		1 Hz – 3 kHz	0.4
		3 kHz – 100 kHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
		3 kHz – 100 kHz	$1.35 \times 10^{-4}f$

Nota: Tomada de International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (2010).
El valor de la frecuencia “f” debe estar en las unidades que se indican en la columna de rango de frecuencias.

Tabla 9

Niveles de referencia para exposición ocupacional a campos eléctricos y magnéticos para frecuencias entre 1 Hz y 100 kHz (valores eficaces no perturbados)

Tipo de exposición	Gama de frecuencias	Intensidad de campo eléctrico (kV/m)	Intensidad de Campo magnético (A/m)	Densidad de flujo magnético (T)
Exposición ocupacional	1 – 8 Hz	20	$1.63 \times 10^5/f^2$	$0.2/f^2$
	8 – 25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^{-2}/f$
	25 – 300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
	300 Hz – 3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2.4 \times 10^5/f$	$0.3/f$
	3 – 100 kHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}
Exposición poblacional	1 – 8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
	8 – 25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
	25 – 50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
	50 – 400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
	0.4 – 3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
	3– 100 kHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Nota: Tomada de International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (2010). El valor de la frecuencia “f” debe estar en las unidades que se indican en la columna de rango de frecuencias.

Exposición a frecuencias múltiples

En condiciones reales la exposición a campos electromagnéticos incluye más de una frecuencia. Para hallar la exposición límite a este tipo de exposición mixta, el ICNIRP ha formulado las siguientes ecuaciones.

❖ En función de las intensidades de campo eléctrico interno (E_{in}) y magnético(H).

Frecuencias entre 1 Hz y 10 MHz:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_{ini}}{E_{inL,i}} \leq 1$$

E_{ini} = intensidad de campo eléctrico en la frecuencia i .

$E_{inL,i}$ = intensidad de campo eléctrico límite de la frecuencia i .

❖ En función de las intensidades de campo eléctrico(E) y magnético(H)

Frecuencias entre 1 Hz y 10 MHz:

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} \leq 1$$

$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} \leq 1$$

Donde:

E_i = intensidad de campo eléctrico en la frecuencia i .

$E_{L,i}$ = intensidad de campo eléctrico límite de la frecuencia i .

H_j = intensidad de campo magnético en la frecuencia j .

$H_{L,j}$ = intensidad de campo magnético límite en la frecuencia j .

En la Figura 6 se muestran los criterios para la adopción de las restricciones básicas a 60 Hz y en la Tabla 10 se muestran las restricciones básicas para la frecuencia de 60 Hz que es la frecuencia de realización del estudio (Cruz, p. 34, 2016).

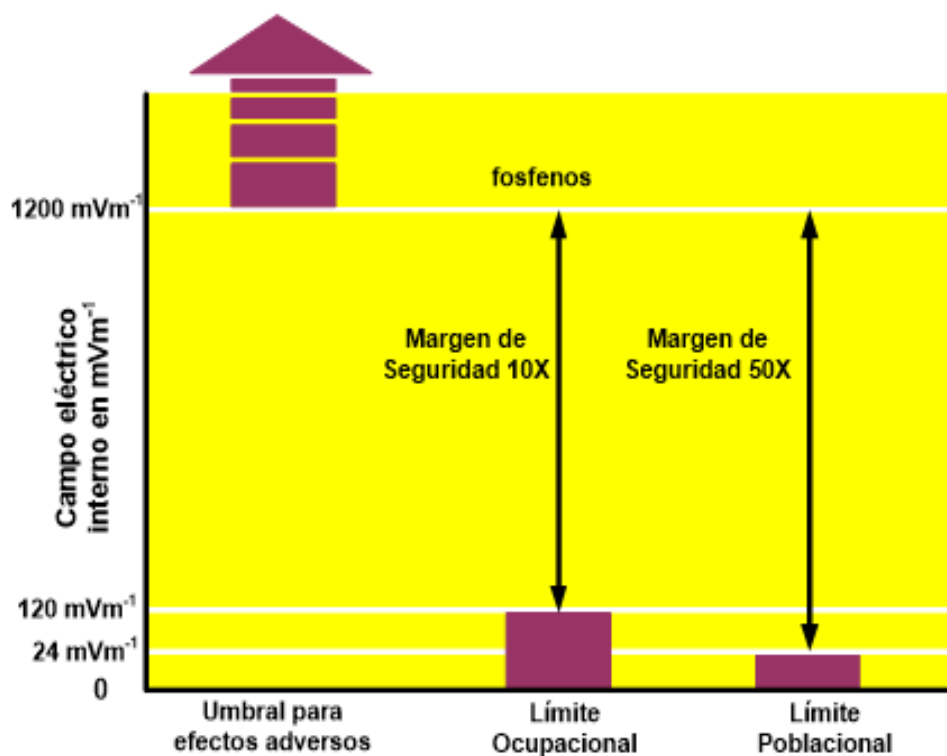


Figura 6. Criterios para la adopción de las restricciones básicas para ELF 60 Hz
Fuente: Cruz, 2016, p. 35

Tabla 10

Restricciones básicas para exposiciones a campos eléctricos y magnéticos para la frecuencia de 60 Hz).

Tipo de exposición	Tejido	Campo eléctrico interno (V/m)
Ocupacional	Sistema Nervioso Central – Cabeza	0.12
	Todos los tejidos de la cabeza y el cuerpo	0.8
Poblacional	Sistema Nervioso Central – Cabeza	0.024
	Todos los tejidos de la cabeza y el cuerpo	0.4

Nota: Tomada (Cruz, 2016, p. 35).

En la Figura 7 se muestran los criterios para la adopción de los niveles de referencia a 60 Hz y en la Tabla 11 se muestran las restricciones básicas para la frecuencia de 60 Hz que es la frecuencia de realización del estudio (Cruz, p. 35, 2016).

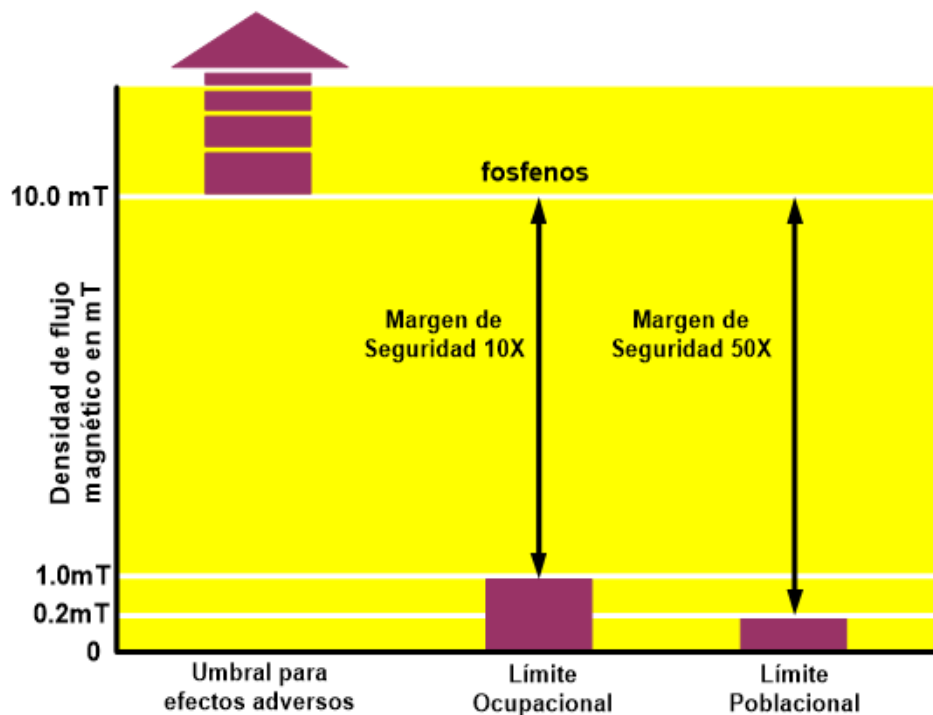


Figura 7. Criterios para la adopción de los niveles de referencia para ELF 60 Hz

Fuente: Cruz, 2016, p. 36

Tabla 11

Niveles de referencia para exposición a campos eléctricos y magnéticos para la frecuencia de 60 Hz (valores eficaces no perturbados).

Tipo de exposición	Intensidad de campo eléctrico (kV/m)	Intensidad de Campo magnético (A/m)	Densidad de flujo magnético (mT)
Ocupacional	8.33	800	1
Poblacional	4.16	160	0.2

Nota: Tomada (Cruz, 2016, p. 36).

Nacional

Decreto Supremo N° 010-2005-PCM.

Mediante este Decreto Supremo N° 010 - 2005 – PCM, el día 03 de febrero del 2005, se aprobaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para Radiaciones No Ionizantes como se observa en la Tabla 12.

Este estándar establece los máximos niveles de intensidad de radiaciones no ionizantes que no deben excederse en el medio ambiente, esto con el fin de salvaguardar la integridad de la salud de las personas y del ambiente mismo (Livia, p. 43, 2018).

Tabla 12

Estándares de calidad ambiental para radiaciones no ionizantes.

Rango de Frecuencias (f)	Intensidad de Campo Eléctrico (E) (V/m)	Intensidad de Campo Magnético (H) (A/m)	Densidad de Flujo Magnético (B) (μ T)	Densidad de Potencia (Seq) (W/m ²)	Principales aplicaciones (no restrictiva)
Hasta 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-	Líneas de energía para trenes eléctricos, resonancia magnética.
1 – 8 Hz	10000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	-	
8 – 25 Hz	10000	$4000 / f$	$5000 / f$	-	Líneas de energía para trenes eléctricos.
0,025 – 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	-	Redes de energía eléctrica, líneas de energía para trenes, monitoreo de video.
0,8 – 3 kHz	$250 / f$	5	6,25	-	Monitoreo de video.
3 – 150 kHz	87	5	6,25	-	Monitoreo de video.
0,15 – 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-	Radio AM
1 – 10 MHz	$87 / f^{0,5}$	$0,73 / f$	$0,92 / f$	-	Radio AM, diatermia
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2	Radio FM, TV VHF, Sistemas móviles y de radionavegación aeronáutica, teléfonos inalámbricos, resonancia magnética, diatermia.
400 – 2000 MHz	$1,375 \times f^{0,5}$	$0,0037 \times f^{0,5}$	$0,0046 \times f^{0,5}$	$f / 200$	TV UFH, telefonía celular, servicio móvil satelital, teléfonos inalámbricos, sistemas de comunicación personal.
2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10	Redes de telefonía inalámbrica, comunicaciones por microondas y vía satélite, radares, hornos microondas.

Nota: Tomada de Presidencia de Consejo de Ministros (2005) 1. f está en la frecuencia que se indica en la columna de Rango de Frecuencias. 2. Para frecuencias entre 100 kHz y 10 GHz, Seq, E2, H2, y B2, deben ser promediados sobre cualquier periodo de 6 minutos. 3. Para frecuencias por encima de 10 GHz, Seq, E2, H2, y B2, deben ser promediados sobre cualquier periodo de 68 / f1,05 minutos (f en GHz).

Sistemas de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas basados en cuatro bobinas cuadradas.

Ley de inducción de Faraday

La ley de Faraday describe el fenómeno conocido como inducción electromagnética. Esta ley relaciona la fuerza electromotriz inducida con la variación del flujo magnético en una espira, bobina o circuito. La inducción electromagnética nos muestra, en esencia, que un campo magnético que varía con el tiempo genera un campo eléctrico. Además, un campo eléctrico no estacionario también actúa como fuente de un campo magnético (Villalba, Ferreira, Arribas, Nájera & Beléndez, 2015).

Esta ley se puede expresar en la forma siguiente: “La fuerza electromotriz inducida (f.e.m) es directamente proporcional a la tasa de cambio del flujo del campo magnético que atraviesa la superficie (área) que encierra la espira”.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

El signo menos que aparece en la ecuación se refiere a la polaridad de la f.e.m inducida es tal que produce una corriente cuyo campo magnético, se opone al cambio que lo produjo, tal como nos dice la ley de Lenz.

Si manejamos una bobina compuesta por N espiras, la ecuación la escribiríamos como:

$$\varepsilon = - N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

siendo Φ_B el flujo magnético que atraviesa una de las espiras.

Capítulo 3

Metodología de desarrollo del proyecto

El diseño del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas está basado en la utilización de dos pares de bobinas cuadráticas, con una igual cantidad de vueltas y calibre de cable, por las cuales circula un flujo de corriente que depende del voltaje de alimentación y de la forma de onda, también será responsable de la generación de campo magnético. Estas bobinas se encuentran separadas a 3 y 6 cm del centro respectivamente, garantizando de esta forma la uniformidad de exposición a campos magnéticos en el interior del sistema.

Las bobinas son alimentadas mediante un generador de funciones que a su vez alimentará el sistema electrónico de amplificación de potencia los cuales se encuentran fuera de la incubadora y se conectan a la bobina mediante cables auxiliares en la Figura 8 se presenta el esquema del sistema completo de exposición para cultivo celular.

El sistema incorpora 2 ventiladores en ambos extremos tanto para la ventilación y extracción del aire caliente, un sensor pt100 que será el encargado de monitorear en cada instante el valor de temperatura dentro del sistema de exposición.

El conjunto de bobinas se instala en una caja metálica de acero quirúrgico, esta caja encaja perfectamente dentro de una incubadora comercial.

Finalmente, el sistema cuenta con un blindaje de micrometal, el cual tiene la finalidad de aislar el interior y protegerlo de alguna perturbación electromagnética proveniente del exterior.

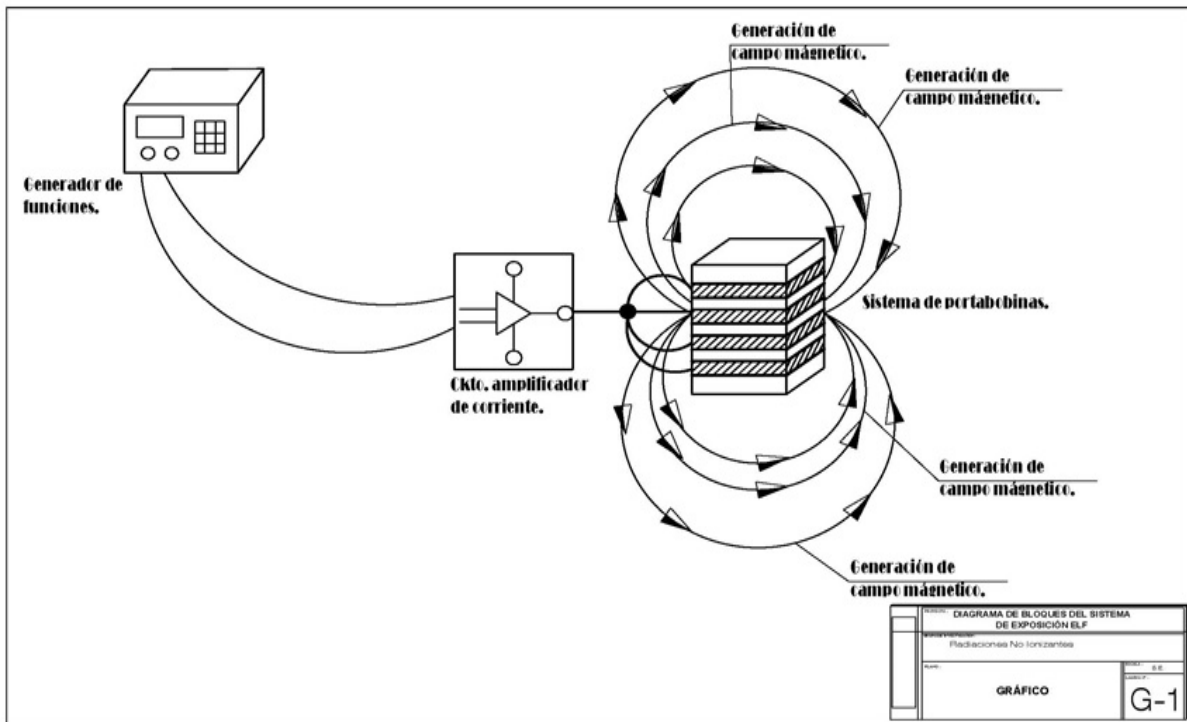


Figura 8. Diagrama General Del Sistema De Exposición In-Vitro
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se muestra una vista de corte del sistema de exposición para cultivo celular. Tal como se puede observar consta de los siguientes elementos:

- 4 Bobinas cuadráticas
- 4 soportes dieléctricos
- 3 juegos de placas de Petri
- 2 ventiladores (extracción e inserción)
- Sensor Pt100
- Caja metálica recubierta de micrometal.
- Mesa portaplacas de Petri

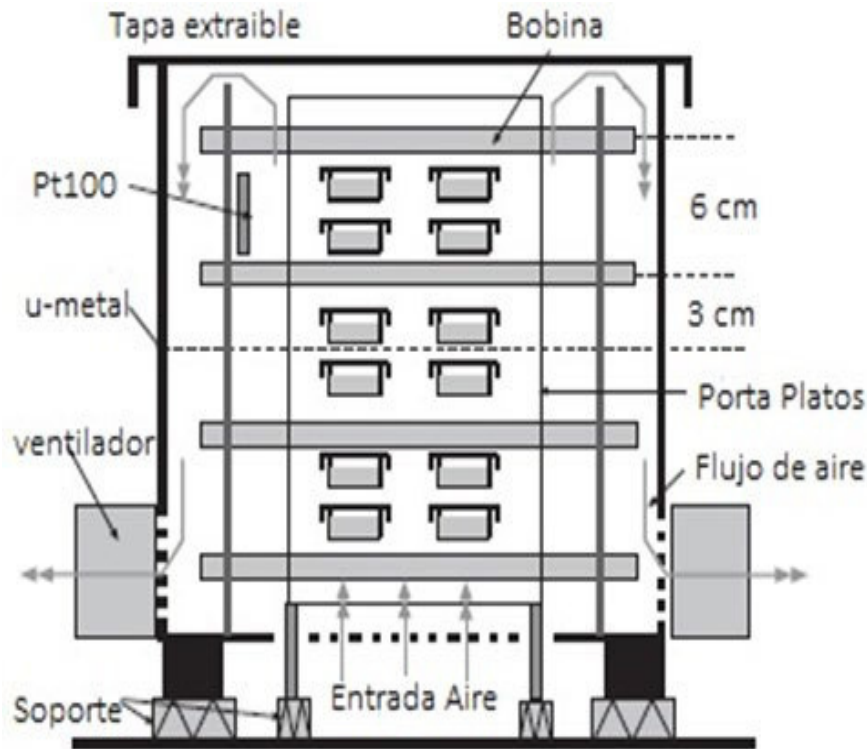


Figura 9. Vista de corte del sistema de exposición in-vitro

Fuente: Elaboración propia.

Principales Características del diseño de exposición

- Tener en cuenta que para un correcto estudio de investigación que involucre cultivos celulares se tiene que cumplir fundamentalmente 2 cosas: el nivel de CO₂ tiene que estar en 5% y la temperatura tiene que estar en 37 °C, dentro de la incubadora comercial.
- El sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas debe tener como principal característica la de garantizar que el nivel de temperatura en todo momento este en 37 °C, mientras dure los estudios de investigación. Ya que un aumento o disminución de este parámetro puede matar los cultivos celulares.
- Al circular un flujo de corriente por el sistema de portabobinas, generara un incremento de temperatura en el medio, es por ello que se consideró en el diseño

inicial los mecanismos para que este aumento de temperatura no altere en nada el valor de 37 °C.

- Todo el sistema de 4 bobinas cuadráticas se coloca dentro de una caja de metal de 25 cm x 25 cm x 25 cm la cual cuenta con una tapa extraíble en la parte superior para permitir el acceso a las placas de Petri, que se colocan en el interior.
- Dimensión del porta bobinas 20cm x 20cm (cuadráticas)
- Las distancias verticales de las bobinas centrales y superiores son de 3 cm y 6 cm respectivamente, las bobinas centrales y superiores están formadas con 200 vueltas de hilo de cobre conductor.
- Para la generación del flujo de corriente se utilizará un generador de funciones comercial, el cual nos permitirá variar el nivel de campo magnético ya que se podrá controlar a libertad el voltaje de entrada el cual oscila entre $0.1V_{pp}$ - $12V_{pp}$. Se garantiza poder trabajar con formas de onda variables en la entrada (senoidal, cuadrada, triangular) ya que el aparato permite este cambio.
- Se contará con una etapa electrónica de amplificación de potencia, debido a que el flujo de corriente entregado por el generador de funciones se encuentra en el orden de los mili amperios (mA).
- Se tiene que garantizar campos magnéticos (B) hasta $2mT_{rms}$
- El tamaño del soporte para las placas de Petri tiene que tener la dimensión de 12 cm x 12cm y 5cm de altura.
- Para el monitoreo de la temperatura en el interior del sistema, se utilizará el sensor de temperatura Pt100.

Implementación del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas

Implementación caja metálica de acero quirúrgico y sistema de portabobinas

Para el diseño de la caja metálica y el sistema de porta bobinas se usó el software de simulación AUTOCAD 2016, como se aprecia en la Figura 10. Una vez concluido con este proceso se procedió a comprar la plancha de metal quirúrgico para ser llevada a la empresa encargada de moldearla y soldarla según el diseño entregado.

La particularidad en la fabricación de esta caja es que todos los cortes y orificios necesarios serán realizados mediante un láser muy potente, normalmente se pudo haber realizado en una máquina de torno, pero al tratarse de campos magnéticos cualquier perturbación en el material puede variar la uniformidad del campo.

El producto final se muestra en la Figura 11, como se aprecia ya se encuentra ensamblada lista para colocar el sistema de porta bobinas en su interior, tal como se muestra en la Figura 12.

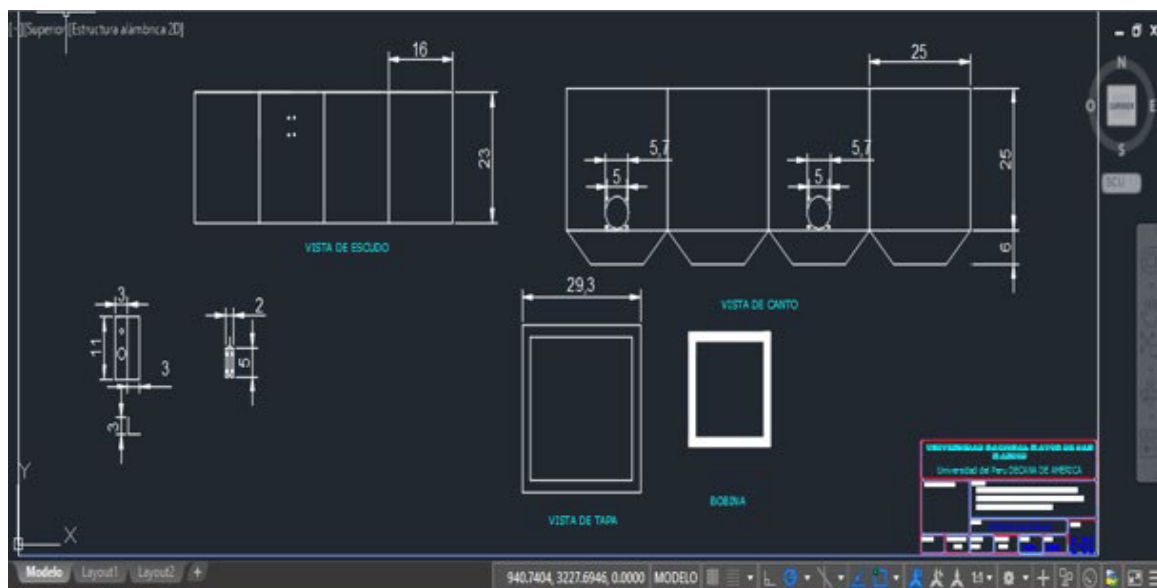


Figura 10. Diseño Final Caja Metálica
Fuente: Elaboración propia.

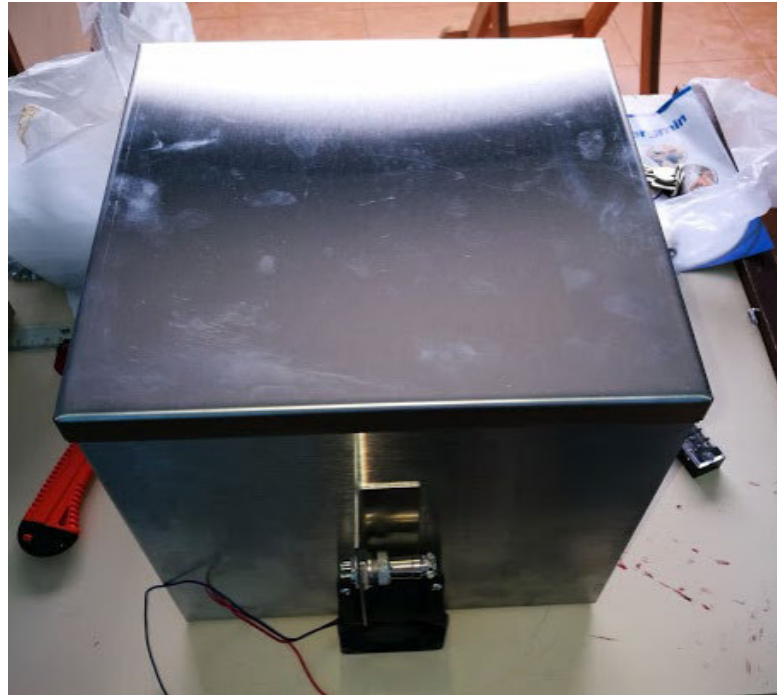


Figura 11. Caja metálica acabado final
Fuente: Elaboración propia.

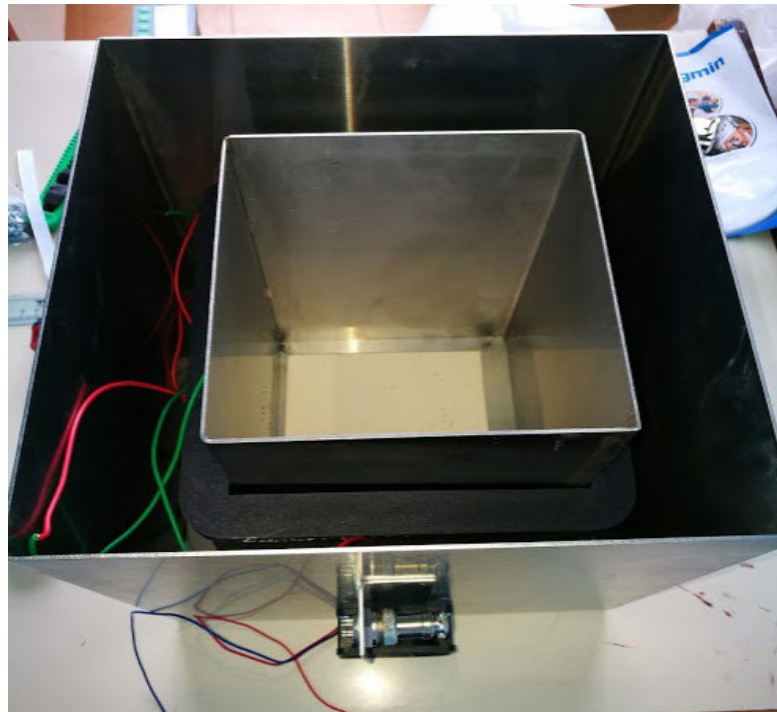


Figura 12. Caja metálica, vista superior
Fuente: Elaboración propia.

Para el sistema de porta bobinas se contrató a una empresa especialista en la fabricación de objetos de acrílico en impresoras 3D, la cual se encargó de la elaboración de los porta bobinas, teniendo un acabado óptimo y de alta presión como se puede apreciar en la Figura 13. El sistema final encaja completamente dentro de la caja metálica como se muestra en la Figura 14.

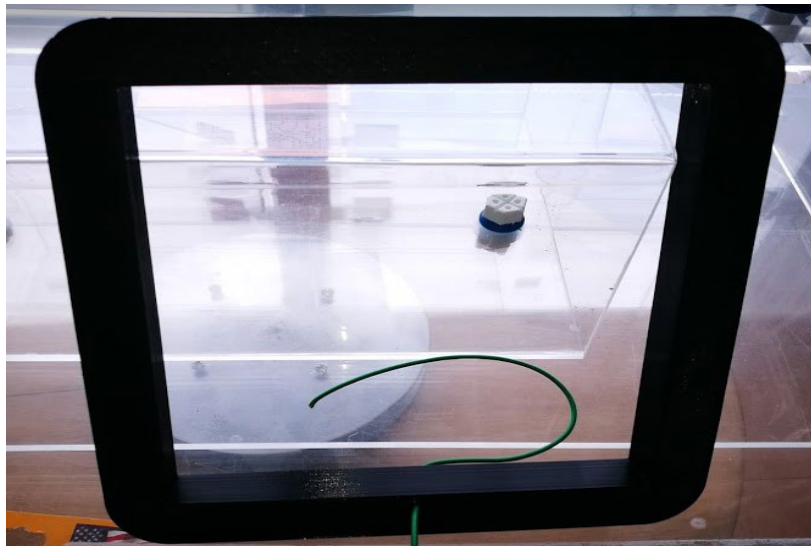


Figura 13. Sistema de Porta Bobinas
Fuente : Elaboración propia.

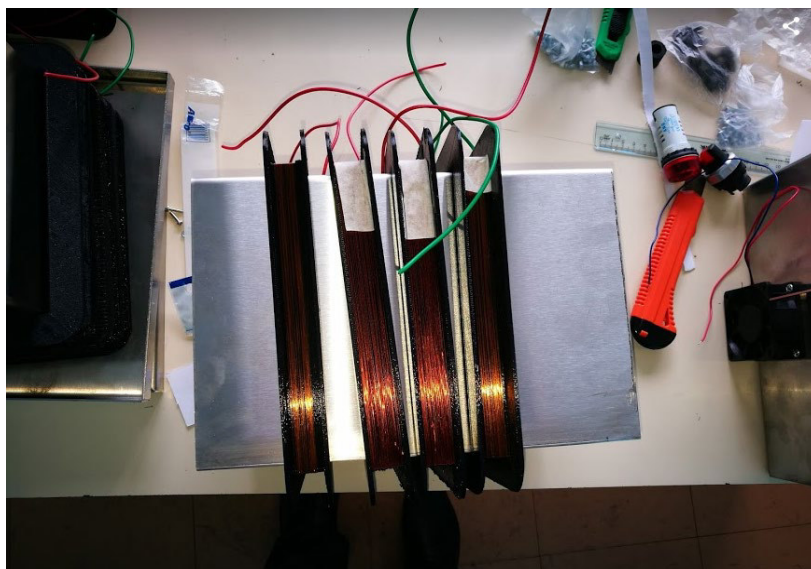


Figura 14. Sistema de Porta Bobinas
Fuente : Elaboración propia.

Implementación del blindaje con el micro metal

Para finalizar la etapa de implementación tanto de la caja metálica de acero quirúrgico y los portabobinas, se procedió a blindarla con la plancha de micro metal como muestra la Figura 15 y Figura 16, esta lamina nos garantiza aislar completamente nuestro sistema de exposición in vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas de cualquier interferencia electromagnética externa y no permitirá escapar el campo magnético generado en su interior. Todo esto es posible gracias a su alta permeabilidad.



Figura 15. Blindaje con la lámina de micro metal
Fuente : Elaboración propia.



Figura 16. Utilización de pegamento industrial para pegar la lámina de micro metal
Fuente: Elaboración propia.

Principales características del micro metal y pruebas de funcionamiento

En la Tabla 13 se muestran las principales características técnicas proporcionadas por el fabricante del micro metal.

Tabla 13

Principales características técnicas del micro metal

Especificaciones técnicas	
Composición principal	Níquel 80%, Molibdeno 5%, Hierro 14%
Gravedad específica	8.74 m/s ²
Dimensiones	30 cm x 90 cm
Espesor	0.35mm
Punto de fusión	1454 °C
Resistividad eléctrica	620μΩ·mm
Inducción de Saturación	7,700 Gauss
permeabilidad inicial	30,000
Permeabilidad B-40	70,000
Permeabilidad B-200	90,000
Permeabilidad máxima	400,000

Nota: Tomado de hoja de datos proporcionada por el fabricante

En la Figura 17 se muestra las diferentes pruebas en laboratorio a las que fue sometida la plancha de micro metal, estas pruebas también son proporcionadas por el fabricante, el método que se usó en el experimento consta de colocar el micro metal de capa en capa hasta llegar a las 8 capas entre el imán y sensor, los materiales usados son los siguientes:

- Imán de neodimio (Diámetro 2.5 cm y grosor 5 mm)
- Gaussímetro F.W. Bell modelo 6010
- El espacio entre el imán y la sonda fue de 5mm
- Espesor micro metal 0.35 mm, total 8 capas

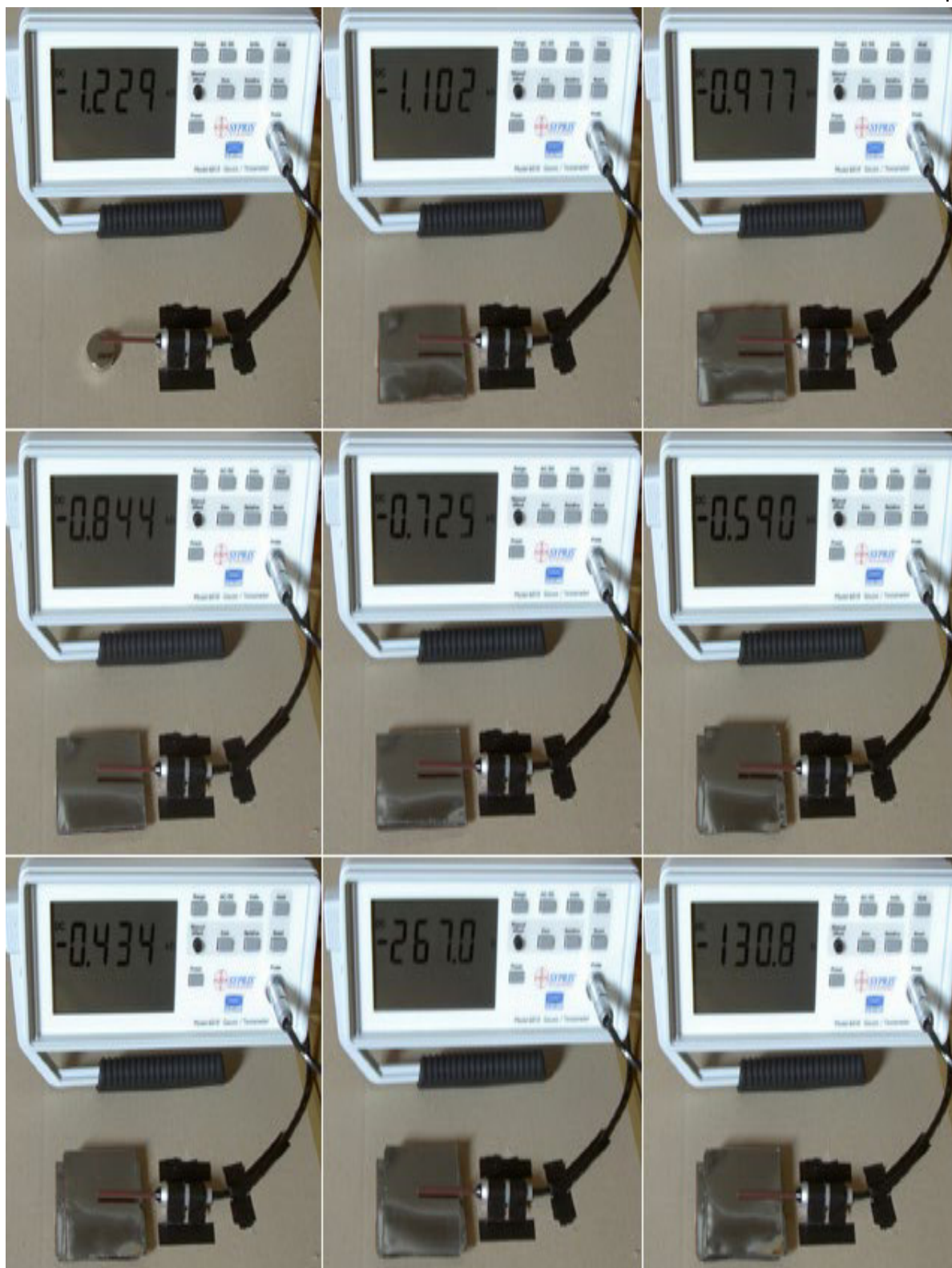


Figura 17. Pruebas de blindaje del campo magnético con el micro metal
Fuente: Hoja de datos proporcionada por el fabricante

En la Tabla 14 se muestra el resumen de las pruebas realizadas para las diferentes capas de micro metal, como recomendación el fabricante nos dice si se desea una protección perfecta del campo magnético del imán de neodimio, use 10 capas de nuestro metal mu de 0.35 mm de grosor.

Tabla 14

Demostración blindaje del campo magnético con el micro metal (con grosor de 0,35 mm)

Capas de micro metal	Total de espesos de capas de micro metal (mm)	Valor medido (G = Gauss)
0	-	1229 G
1 capa	0.35	1102 G
2 capas	0.7	977 G
3 capas	1.05	844 G
4 capas	1.4	725 G
5 capas	1.75	590 G
6 capas	2.1	434 G
7 capas	2.45	267 G
8 capas	2.8	131 G

Nota: Tomado de hoja de datos proporcionada por el fabricante

En la Figura 18 se muestran las pruebas realizadas en laboratorio con la plancha de micro metal para el blindaje del campo geomagnético.

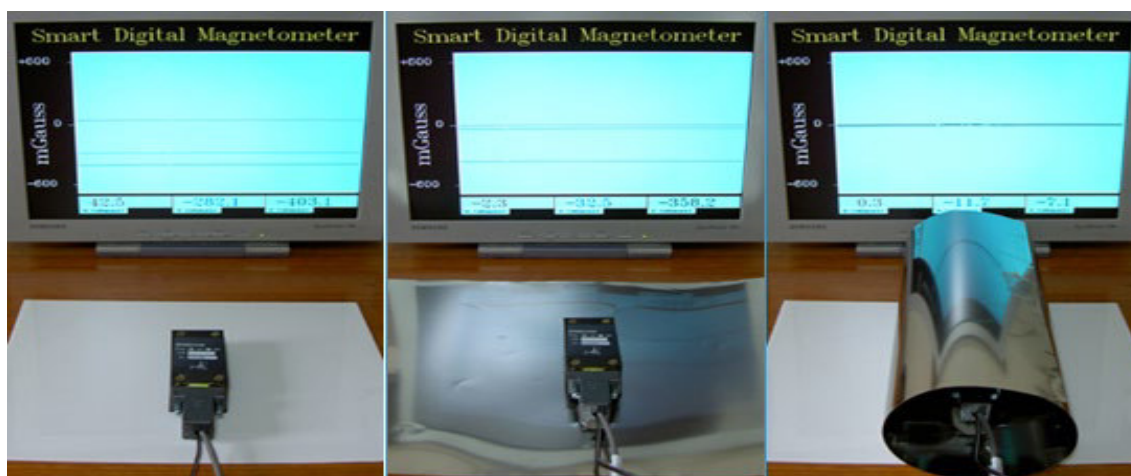


Figura 18. Blindaje del campo geomagnético utilizando la plancha de micro metal

Fuente: Hoja de datos proporcionada por el fabricante

Costos de fabricación caja metálica de acero quirúrgico y sistema de portabobinas

La Tabla 15 presenta los costos de los materiales utilizados en la realización de la implementación de la caja metálica de acero quirúrgico y sistema de portabobinas.

Tabla 15

Costo de implementación caja metálica de acero quirúrgico y sistema de portabobinas

Materiales	Cantidad	Subtotal (S/.)	Total (S/.)
Plancha metálica de acero quirúrgico	1	600.00	600.00
Transporte de la plancha metálica para su cortado	1	150.00	150.00
Costo de fabricación caja metálica de acero quirúrgico	4	250.00	1,000.00
Cooler de ventilación y extracción	8	40.00	320.00
Mesa portaplacas de Petri	4	100.00	400.00
Materiales diversos (conectores, espagueti, terminales, tornillos, etc)	1	100.00	100.00
Fabricación de los portabobinas	24	175.00	4,200.00
Alambre de cobre para portabobinas + servicio de bobinado	4	300.00	1,200.00
Blindaje de micro metal para la caja metálica de acero quirúrgico	4	800.00	3,200.00
		Total	11,170.00

Nota: El presente cuadro es de elaboración propia.

Implementación Del Control De Temperatura

Para la implementación del control de temperatura se usó una sonda pt100 de 3 hilos equipado con una termocupla (sensor de temperatura).

Esta sonda se encuentra conectado a un controlador de temperatura Schneider el cual tiene diferentes funciones de programación a su vez cuenta con un límite tanto inferior como superior (programable) para un mejor control, a continuación, en la Figura 19 se puede apreciar ambos componentes electrónicos.



Figura 19. Sonda Pt100 y controlador de temperatura Schneider
Fuente: Elaboración propia

Costo sonda Pt100 y controlador de temperatura Schneider

La Tabla 16 se muestra el precio tanto para la sonda Pt100 y para el controlador de temperatura Schneider.

Tabla 16

Costo sonda Pt100 y controlador de temperatura Schneider

Materiales	Cantidad	Subtotal (S/.)	Total (S/.)
Sonda Pt100	4	80.00	320.00
Controlador de temperatura Schneider	4	250.00	1,000.00
Total			1,320.00

Nota: El presente cuadro es de elaboración propia.

Implementación del circuito electrónico de amplificación de corriente

El circuito electrónico de amplificación de corriente tiene como elemento principal un circuito integrado monolítico con encapsulado Multiwatt15, clase AB para aplicaciones de alta fidelidad (IC TDA 7294). El cual es fabricado por ST Microelectronics, en la Figura 20 se observa la distribución de pines para su conexión.

El TDA 7294 es ampliamente utilizado en los amplificadores de audio comerciales.

Entre sus principales características tenemos:

- Alto rango de voltaje operativo ($\pm 40\text{v}$)
- Alta potencia de salida (hasta 100W)
- Funciones de “Muting” y “Stand-by”
- Sin interruptor de encendido y apagado
- Muy baja distorsión
- Ruido muy bajo
- Protección en cortocircuito
- Apagado térmico

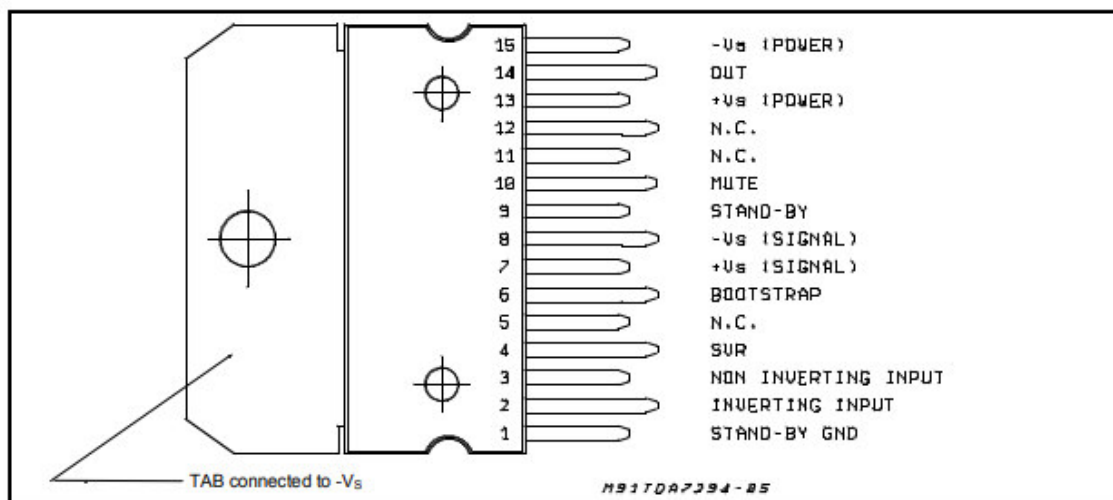


Figura 20. Distribución de pines IC TDA 7294

Fuente: Tomado Datasheet TDA 7294

En la Figura 21 se muestra el diagrama de bloques del IC TDA 7294 el cual se subdivide en 4 bloques:

- Etapa de entrada de transconductancia bipolar
- Etapa de ganancia y cambio de nivel
- Etapa de salida
- Protección contra cortocircuitos

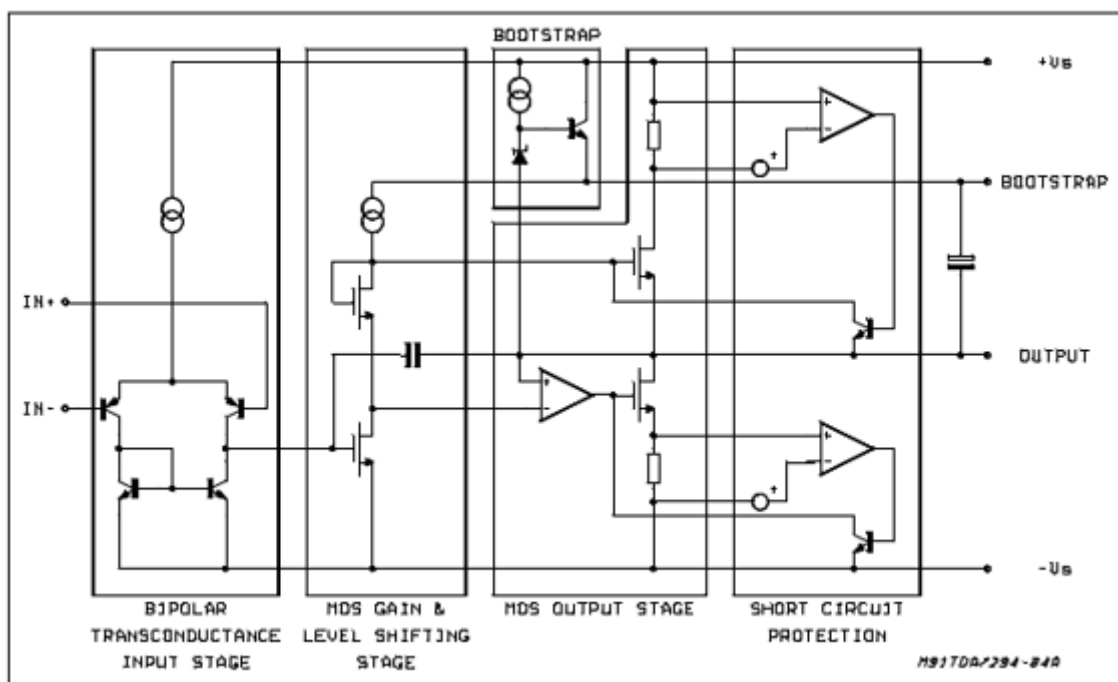


Figura 21. Diagramas de bloques IC TDA 7294

Fuente: Tomado Datasheet TDA 7294

Para la fabricación del circuito electrónico de amplificación se usó el diagrama que se muestra en la Figura 22, este mapa esquemático se tomó del datasheet que el fabricante proporciona, no se pudo lograr simular dicho circuito electrónico ya que ningún software de simulación cuenta con el circuito integrado TDA 7294 entre sus librerías.

Al no poderse simular se tuvo que seguir la recomendación dada por el fabricante, quien nos indica que usemos dicha configuración para la elaboración de nuestro amplificador de potencia.

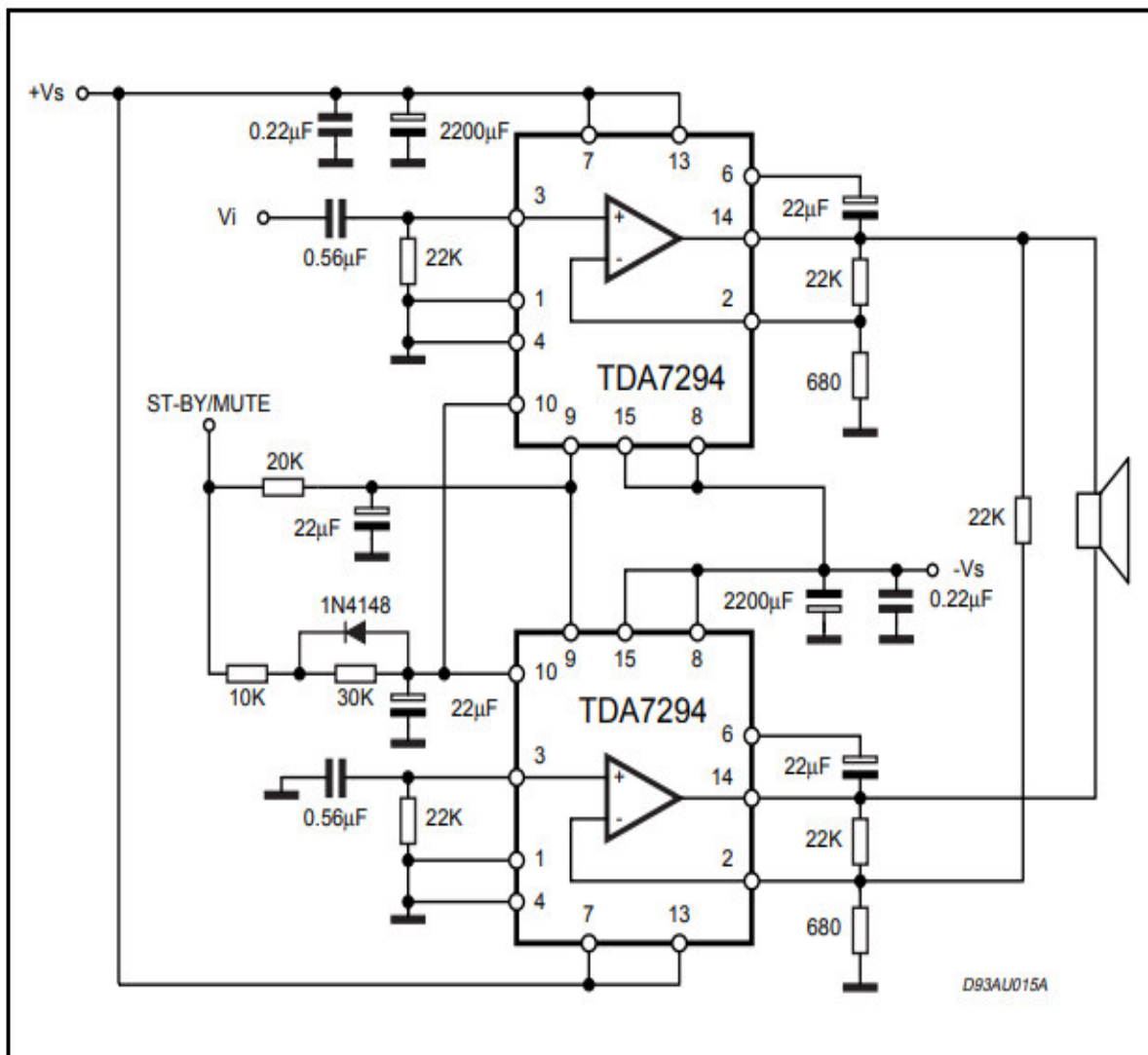


Figura 22. Diagrama esquemático circuito electrónico de potencia
Fuente: Tomado Datasheet TDA 7294

Una vez que se cuenta con la arquitectura del circuito electrónico amplificador de corriente, se pasó a desarrollar el circuito impreso (PCB) con la ayuda de un software de simulación tal como se puede apreciar en la Figura 23 y Figura 24, vista frontal y vista trasera respectivamente

Tener en cuenta que para el diseño del PCB no es necesario tener la librería del TDA 7294 ya que solo nos basta saber el número de pines y la forma de este. Los softwares de simulación para tarjetas impresas, permiten crear cualquier componente así no se cuente la librería de este.

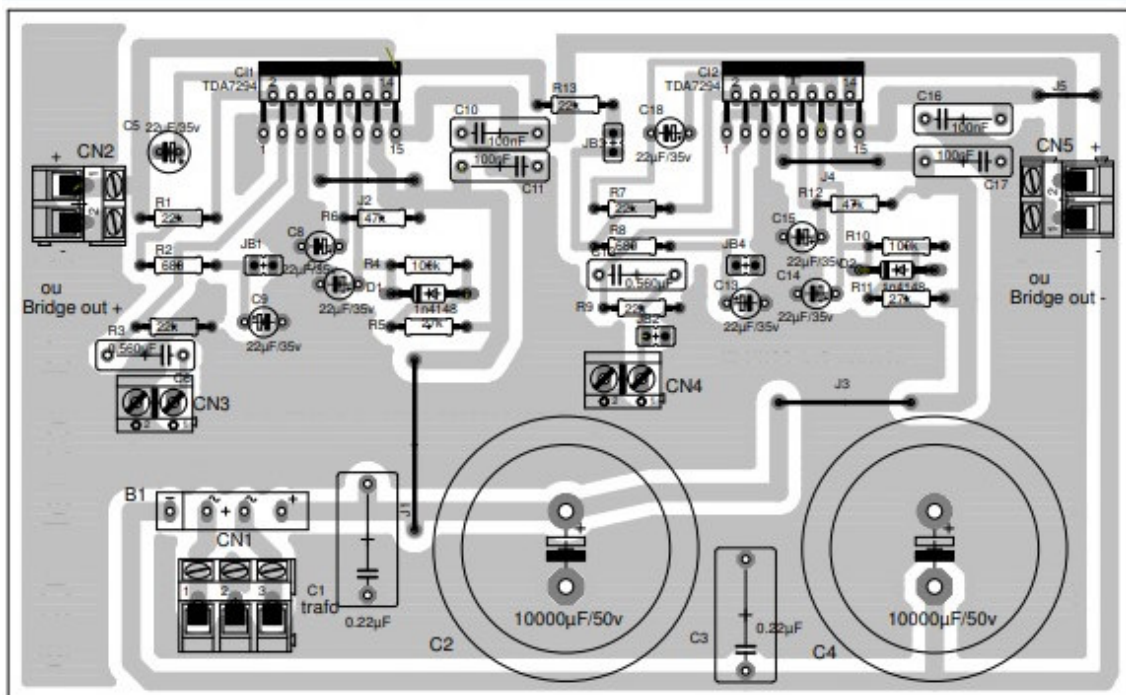


Figura 23. Vista frontal tarjeta impresa (PCB)

Fuente: Elaboración propia

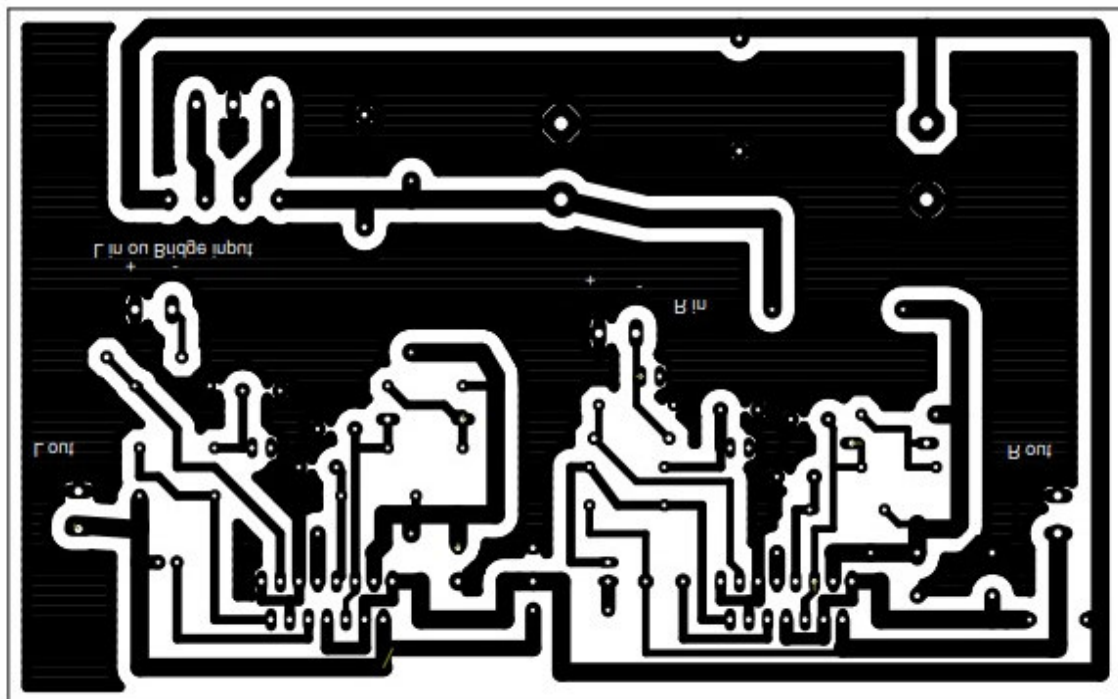


Figura 24. Vista trasera tarjeta impresa (PCB)

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se plasma en la fibra de vidrio el diseño de la tarjeta impresa (PCB) con la ayuda del ácido corrosivo, el cual tiene la función de limpiar las partes de cobre que no intervienen en el diseño de la tarjeta electrónica.

Teniendo las pistas listas para nuestra tarjeta impresa, después de haber pasado por el ácido corrosivo, se comenzó a perforar los orificios, para los distintos componentes electrónicos, los cuales se soldarán con la ayuda de estaño a la fibra de vidrio.

Teniendo un acabo final como se aprecia en la Figura 25, como se puede apreciar los dos integrados TDA 7294 se encuentran conectados al mismo disipador de calor, para evitar cortocircuitos se usó protectores de plástico entre el disipador y el componente electrónico. De este modo se garantiza completamente que no se corre riesgo alguno ante un posible cortocircuito, a su vez se puede apreciar el puente de diodos y un condensador electrolítico, ambos componentes cumplen la función de rectificación del voltaje de entrada.

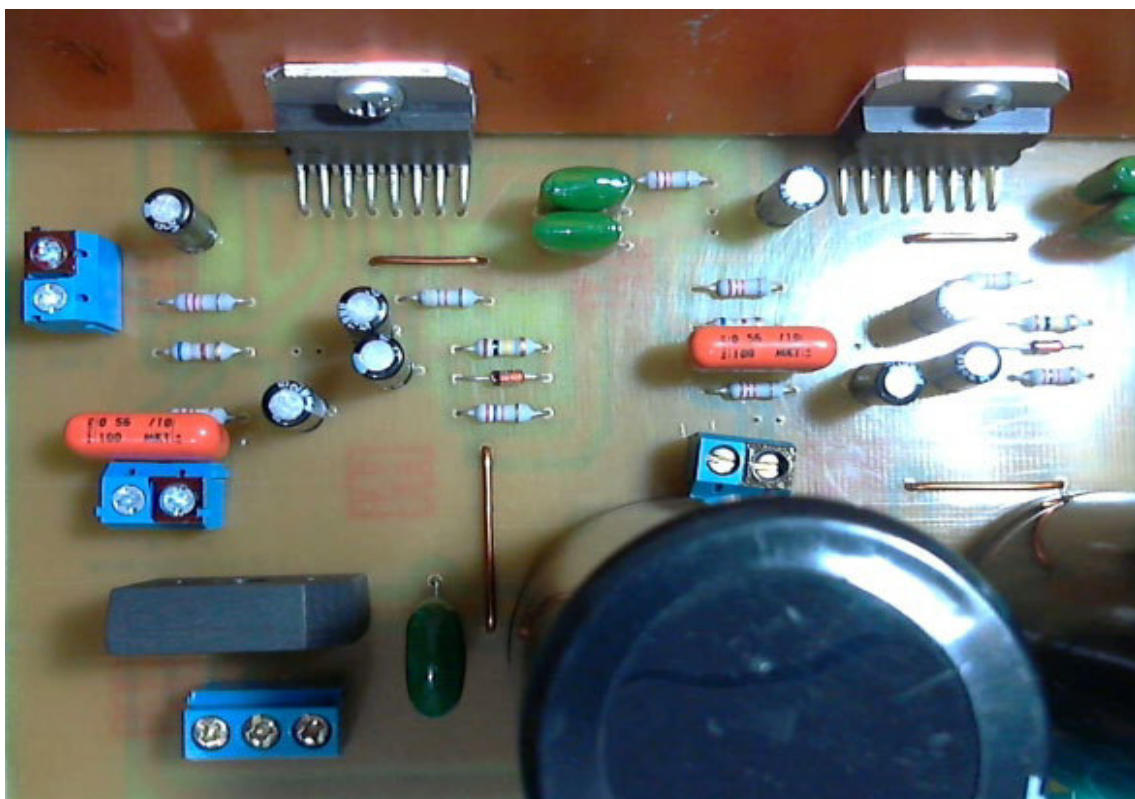


Figura 25. Tarjeta electrónica final
Fuente: Elaboración propia

Costos de fabricación circuito electrónico amplificador de corriente

La Tabla 17 presenta los costos de los materiales utilizados en la realización de la implementación de la tarjeta electrónica de amplificación de corriente.

Tabla 17

Costo de implementación circuito electrónico amplificador de corriente

Materiales	Cantidad	Subtotal (S/.)	Total (S/.)
IC TDA 7294	8	25.00	200.00
Transformador a 6A de derivación central 40-0-40	4	200.00	800.00
Condensador electrolítico 3300uF/50V	8	4.00	32.00
Condensador electrolítico 2200uF/50V	16	2.00	32.00
Condensador electrolítico 22uF/50V	16	1.00	16.00
Condensador cerámico 0.22uF	10	0.20	2.00
Condensador cerámico 0.56uF	10	0.20	2.00
Diodo 1N4148	8	1.00	8.00
Resistencias de 1W diversas	1	30.00	30.00
Potenciómetro 1K Ω	5	2.00	10.00
Potenciómetro de precisión 5K Ω	5	3.00	15.00
Regulador de voltaje LM317	4	8.00	32.00
Puente de diodos 8A	4	5.00	20.00
Borneras de 3 contactos	4	2.00	8.00
Borneras de 2 contactos	4	2.00	8.00
Plancha de fibra de vidrio	1	120.00	120.00
Disipador de calor para IC TDA 7294	8	5.00	40.00
Postes de sujeción	16	0.50	8.00
Buzzer	4	5.00	20.00
Selector	4	25.00	100.00
Tubo flexible + conector	4	20.00	80.00
Cautín + estaño	1	150.00	150.00
Caja de montaje	4	20.00	80.00
		Total	1,813.00

Nota: El presente cuadro es de elaboración propia.

Pruebas de funcionamiento y rendimiento de la tarjeta electrónica de amplificación de corriente

Una vez que se terminó con la implementación de la tarjeta electrónica destinada a realizar el proceso de amplificación de corriente, se pasó a realizar tanto las pruebas de funcionamiento como la de rendimiento. En la Figura 26 se puede apreciar las pruebas en laboratorio para nuestra tarjeta impresa, se observa que dichas pruebas se realizaron con un parlante de 8Ω , conectado a la etapa de salida.

Para la etapa de entrada o señal de ingreso se usó un generador de funciones comercial, que entre sus principales características nos permite seleccionar 3 formas de ondas (senoidal, diente de sierra y cuadrada) y proporciona un voltaje de $0.1V_{pp}$ - $12V_{pp}$.

Para realizar la conexión entre el generador de funciones y la etapa de entrada de nuestra tarjeta electrónica se utilizó una sonda original de osciloscopio, esto nos garantizara que la interferencia sea mínima.

El transformador con derivación que se muestra cumple la función de activar los componentes electrónicos previstos en la tarjeta electrónica, es por ello que antes de realizar esta función pasa por la etapa de rectificación.

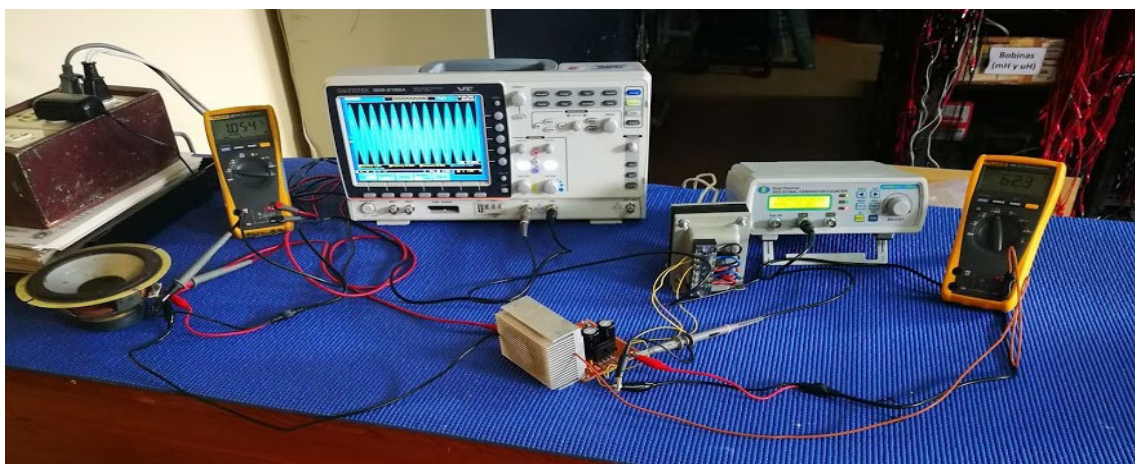


Figura 26. Pruebas de funcionamiento etapa de amplificación de corriente
Fuente: Elaboración propia

Ensamblaje final y prueba de campo magnético

Después de realizar las pruebas en el laboratorio y habiendo comprobado que las características de funcionamiento cumplen de manera óptima y con un alto rendimiento a lo planteado inicialmente en la etapa de diseño, se procedió al ensamblaje final de todos los componentes que intervendrán en la generación de campo magnético. Como se muestra en la Figura 27.

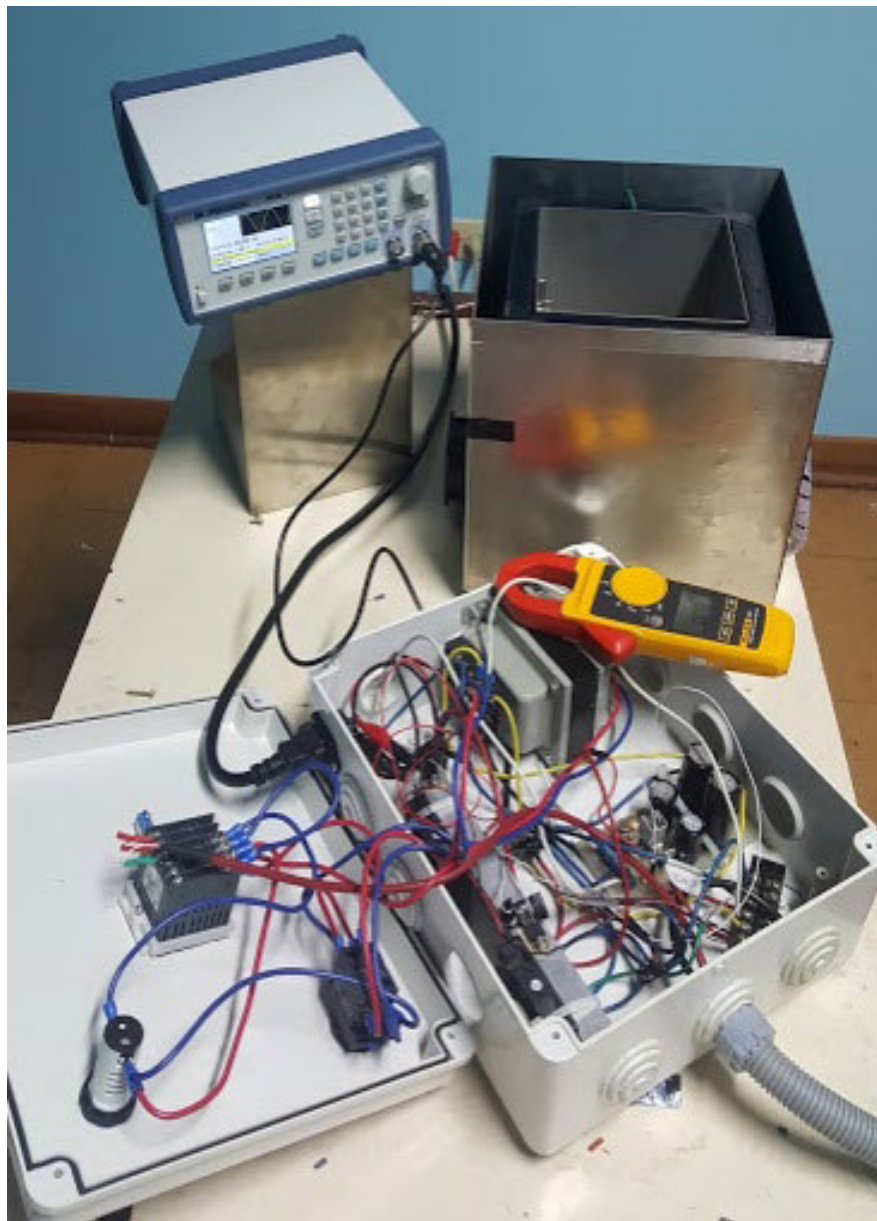


Figura 27. Ensamblaje final, para la generación de campo magnético
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 28 se puede observar que el flujo de corriente en la entrada del sistema de porta bobinas es de 3.27A, medido con una pinza amperimetrica de la marca Fluke.

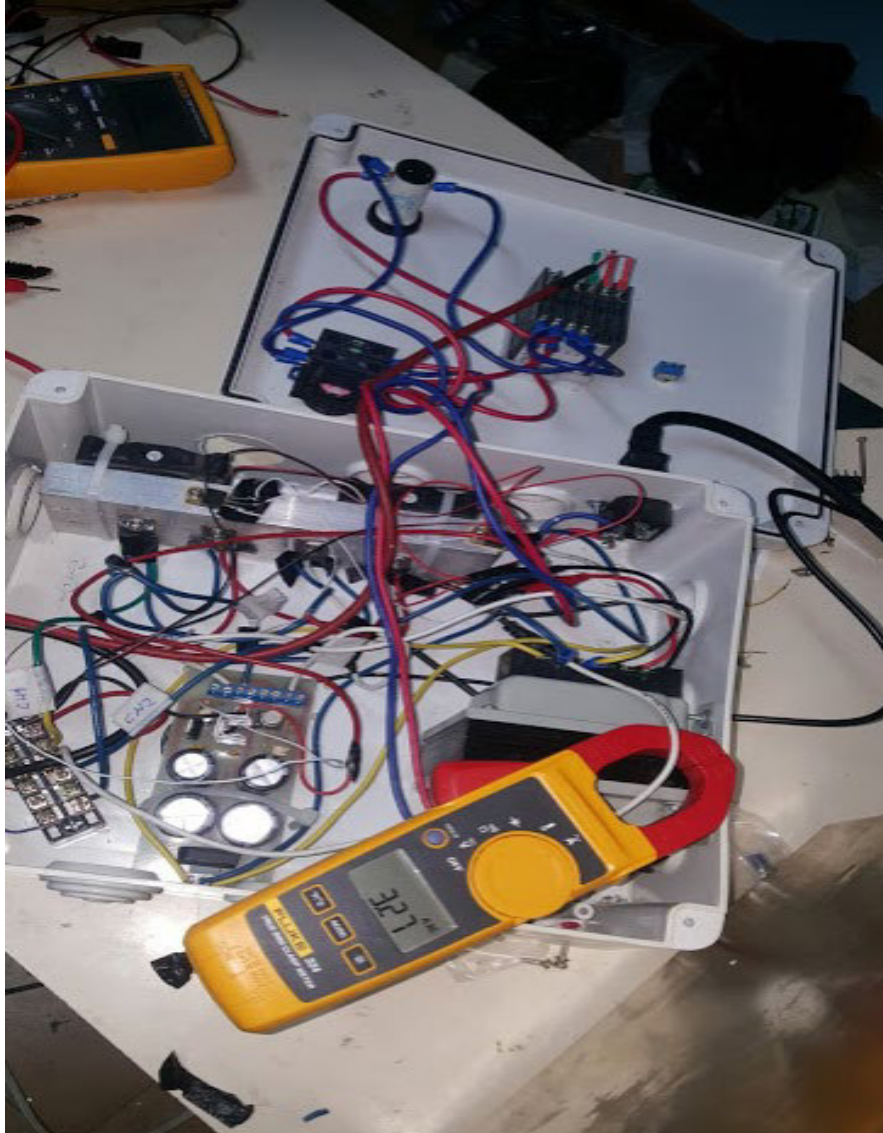


Figura 28. Flujo de corriente para la generación de campo magnético
Fuente: Elaboración propia

Este valor de corriente garantiza un nivel de campo magnético de 1.023 mT. Como se muestra en la Figura 29, dicho nivel se obtiene al usar el medidor de campos electromagnéticos semi-selectivo EFA-300 de fabricación alemana.

Este aparato cuenta con una sonda isotrópica, la cual posee un rango de frecuencia de operación que va desde 5Hz hasta 32kHz.

Como ya se explicó en capítulos anteriores el fin de este trabajo de tesis es analizar el comportamiento de las líneas de energía eléctrica las cuales trabajan en nuestro país a la frecuencia de 60Hz, este valor está contenido en el rango de operación del equipo medidor de campos electromagnéticos EFA-300. Por ello podemos garantizar que la medición será confiable, en el Apéndice B se muestra a detalle las especificaciones técnicas del equipo.



Figura 29. Prueba de campo magnético usando el medidor semi-selectivo EFA - 300
Fuente: Elaboración propia

De este modo se logró obtener el valor de campo magnético planteado en el diseño inicial, a su vez se garantiza una óptima amplificación de corriente.

Diseño e implementación de un generador de funciones arbitrarias

Como parte de la etapa final del proyecto de tesis se decidió diseñar e implementar un generador de funciones arbitrarias necesario para poder realizar las pruebas biológicas con el sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas.

La decisión también se justifica por el elevado costo de un generador de funciones arbitrarias, es por ello que no solo se diseñara e implementara un generador de funciones, adicionalmente lo dotaremos de la función arbitraria, el cual nos va permitir crear a criterio del investigador las formas de onda que crea conveniente.

Planteamiento del generador de funciones arbitrarias

El generador de señales arbitrarias se basa en el uso de un microcontrolador en conjunto con una memoria RAM estática, un conversor digital analógico resistivo (DAC), un acondicionador de señal(opamps) y lógica combinacional diversa.

El generador de funciones entrega las siguientes señales: senoidal, triangular, diente de sierra, cuadrada, y arbitraria.

Cada una de las señales es generada a partir de un número de muestras guardadas en la memoria interna del microcontrolador (memoria del programa o EEPROM). El número de muestras usada para cada señal es de 200. Cada muestra tiene un valor asignado, las cuales son un valor que varía desde 0 a 255.

Los valores son asignados según el tipo de onda al que representa, por ejemplo, para generar la señal senoidal, usamos la fórmula matemática que describe las ondas senoidales:

$$\sin(t) = Offset + A \sin(2\pi ft)$$

Donde:

Offset: Cantidad agregada al resultado de la función seno para que el resultado sea un número entero positivo.

A: Amplitud de la función.

F: frecuencia de 1 de la función, para que las muestras obtenidas representen solo un período de la señal.

En la Figura 30 se muestra la ecuación convertida a código C

```

1  #include <iostream>
2  #include <math.h>
3
4  #define PI  3.1416
5
6  using namespace std;
7
8  int sineArray[200]={0};
9
10 int main(void) {
11     int i;
12     for(i=0;i<200;i++) {
13         sineArray[i]=128+127*sin(1.8*((float) i/180)*PI);
14         cout<<sineArray[i]<<" ";
15     }
16     cin.get();
17     return 0;
18 }
```

Figura 30. Código en “C” para la generación de la onda senoidal

Fuente: Elaboración propia

La ecuación en la línea 13 del código se ejecuta 200 veces dentro de un ciclo FOR, como se muestra en la Figura 31.

El resultado de la función seno multiplicado por la amplitud de valor 127, nos da como resultado valores entre -127 y 127, entonces para llevarlo dentro del rango permitido, le sumamos a cada muestra el valor de 128, de esta forma los valores de la función no dará entre 1 y 255.

```
uint8_t sine[200]= {
    128,131,135,139,143,147,151,155,159,163,167,171,174,178,182,185,189,192,196,199,
    202,205,208,211,214,217,220,223,225,228,230,233,235,237,239,241,242,244,246,247,
    248,249,251,251,252,253,253,254,254,254,254,254,253,253,252,251,251,249,
    248,247,246,244,242,241,239,237,235,233,230,228,225,223,220,217,214,211,208,205,
    202,199,196,192,189,185,182,178,174,171,167,163,159,155,151,147,143,139,135,131,
    128,124,120,116,112,108,104,100,96,92,88,84,81,77,73,70,66,63,59,56,53,50,47,44,
    41,38,35,32,30,27,25,22,20,18,16,14,13,11,9,8,7,6,4,3,2,2,1,1,1,1,1,1,1,2,3,
    4,4,6,7,8,9,11,13,14,16,18,20,22,25,27,30,32,35,38,41,44,47,50,53,56,59,63,66,70,
    73,77,81,84,88,92,96,100,104,108,112,116,120,123
};
```

Figura 31. Muestras generadas para la señal senoidal

Fuente: Elaboración propia

De igual manera se trabaja para la función cuadrada, diente de sierra. Combinando la ecuación descrita dentro del bucle FOR, como se puede apreciar en las Figuras 32 y Figura 33 respectivamente

```
1  #include <iostream>
2  #include <math.h>
3
4  #define PI 3.1416
5
6  using namespace std;
7
8  int signal[200]={0};
9
10 int main(void) {
11     int i;
12     for(i=0;i<200;i++) {
13         if(i<100)
14             signal[i]=0;
15         else
16             signal[i]=255;
17         cout<<signal[i]<<" ";
18     }
19     cin.get();
20     return 0;
21 }
```

Figura 32. Código en “C” para la generación de la onda cuadrada

Fuente: Elaboración propia

```

1  #include <iostream>
2  #include <math.h>
3
4  #define PI 3.1416
5
6  using namespace std;
7
8  int signal[200]={0};
9
10 int main(void){
11     int i;
12     float r=1.275;
13     cout<<r<<endl;
14     for(i=0;i<200;i++){
15         signal[i]=(float)i*r;
16         cout<<signal[i]<<",";
17     }
18     cin.get();
19     return 0;
20 }

```

Figura 33. Código en “C” para la generación de la onda Sierra

Fuente: Elaboración propia

El código en C para la generación de las muestras de las señales se realiza con el Codeblocks.

El trabajo del microcontrolador es tener almacenadas estas señales en su memoria interna, para luego descargarla en la memoria RAM, luego la memoria RAM es la encargada de generar la señal deseada.

Etapas del generador

El diseño del generador de funciones arbitrarias está dividido en las siguientes etapas:

Control central

Compuesto por el microcontrolador, el cual maneja la comunicación con la pantalla nextion a través del protocolo uart a velocidad de 9600bps. Además, es el encargado de definir las muestras que serán enviadas al DAC (mediante la RAM), y de atender las

interrupciones ocurridas en la pantalla táctil. En la Figura 34 se muestra la gráfica del bloque de control.

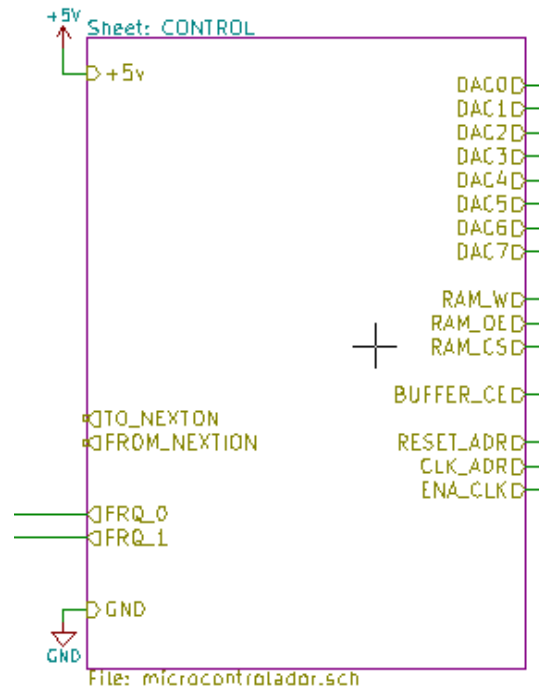


Figura 34. Gráfica del bloque de control
Fuente: Elaboración propia

El microcontrolador usado es de la marca Atmel, modelo atmeg32, funcionando a una frecuencia de 16Mhz. El código fuente del microcontrolador se realiza en lenguaje “C”, gracias al IDE Atmel Studio el cual da la plataforma y el compilador gcc integrado en el Winavr.

Memoria RAM

Bloque en el que se encuentra la memoria RAM estática HY6116A, el cual es una memoria volátil estática de 2Kx8bits de almacenamiento. En esta memoria solo se utilizarán 200 bytes de los 2048 que posee, empezando desde la dirección 0 hasta la 199.

La memoria es de 8 bits de dato, cuyos valores pueden variar desde 0 hasta 255, y pueden ser insertados u obtenidos mediante su puerto de datos de 8 pines (I/O0... I/O7). Posee un pin CS para poder seleccionar el chip (activo en bajo) y poder habilitar o deshabilitar sus funciones.

WE para poder habilitar la escritura de datos en su interior, OE para habilitar o deshabilitar le puerto de salida, poniéndolo en alta impedancia. Además, cada registro puede ser seleccionado por medio de su puerto de direccionamiento. Al ser de un tamaño de 2048 bytes, entonces necesita un puerto de direcciones de 11 pines ($(2)^n = 2048$, entonces $n=11$, A0,A1...A10). En la Figura 35 se muestra el bloque de la memoria RAM.

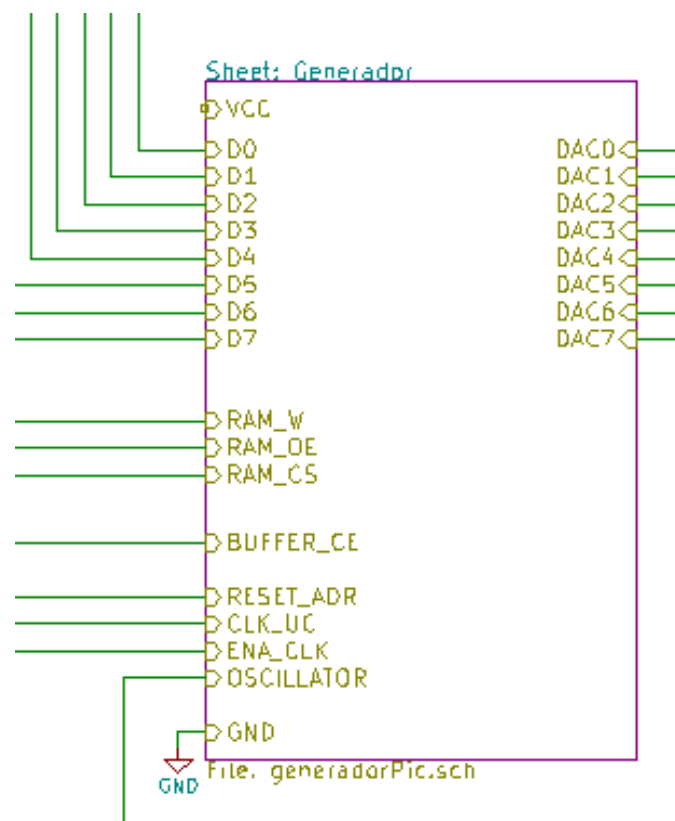


Figura 35. Gráfica del bloque de la RAM
Fuente: Elaboración propia

Para la generación de la señal se necesita que la memoria RAM entregue cada uno de los valores que se encuentran en su interior, para ello su entrada de direcciones debe cambiar constantemente, ello se hace con el contador de 8 bits a base del integrado 4040. Como las direcciones que debe direccionar el contador va desde 0 hasta 199 (por el número de muestras de la señal), entonces se necesita formar un contador mod200, para que de esta forma cuente desde 0 hasta 199, y no hasta completar el valor de 255 que se generan por usar 8 pines de su salida, esto se logra utilizando Q6, Q7 y Q3 del 4040 a través de una compuerta AND de 3 entradas y enviándolo a reset del mismo integrado. Gráficamente se puede apreciar en la Figura 36.

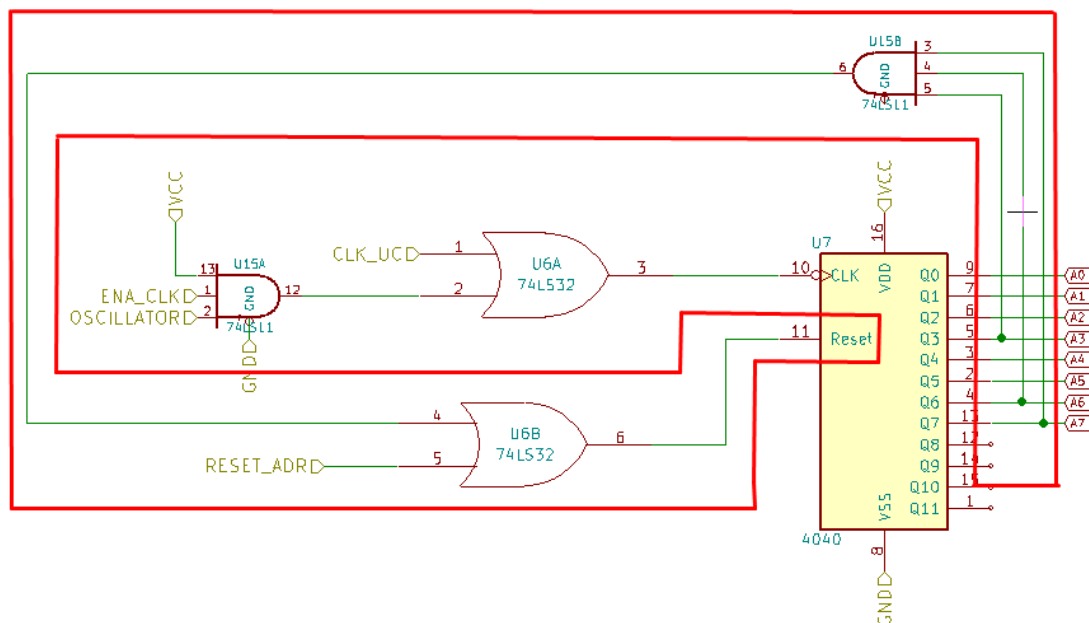


Figura 36. Reset del microcontrolador 4040 usando la compuerta AND

Fuente: Elaboración propia

La compuerta OR U6 permite poder resetear el contador desde el microcontrolador, con el pin llamado RESET_ADR.

La lógica combinacional mostrada en la Figura 37 permite el control del reloj de la RAM. EL reloj del contador puede venir de dos fuentes, una es el reloj generado por el

microcontrolador a la hora de pasar sus datos a la memoria, y el otro es el reloj proveniente de un oscilador dedicado para poder funcionar independientemente del microcontrolador, aunque este oscilador puede ser desactivado por el control del mismo microcontrolador cuando realiza la trasferencia de sus datos a la RAM.

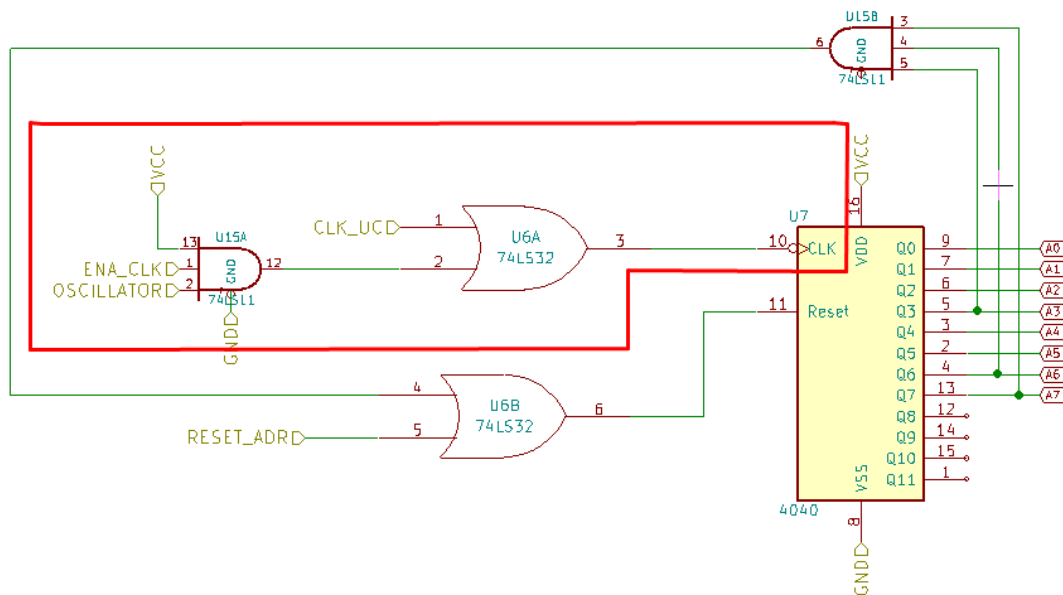


Figura 37. Control del reloj del contador de direcciones
Fuente: Elaboración propia

Oscilador dedicado

El oscilador se basa en el integrado 74hc14, la frecuencia de oscilador viene dada por la formula $\frac{0.8}{RC}$

Donde R está formada por la resistencia R22 y el potenciómetro RV3, y C por C3 con un valor de 10nF y R22 = 100 Ohmios y RV3 de 2MOhmios, como se aprecia en la Figura 38.

Podemos tener una frecuencia de oscilación que va desde aproximadamente 200Hz hasta 200Khz. Cada pulso de reloj entregado por este oscilador hará que el contador de direcciones de la RAM varié en una posición, entonces, al poseer cada señal unos 200 valores

de datos de la RAM, la frecuencia del oscilador de 200Hz nos dará en la salida una señal de 1Hz ($200\text{Hz}/200$) hasta 1kHz($200\text{kHz}/200$).

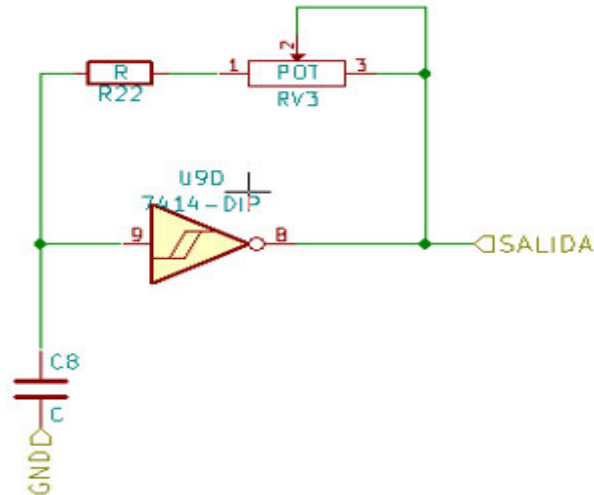


Figura 38. Oscilador independiente
Fuente: Elaboración propia

Convertor digital Analógico

En la Figura 39 se muestra un DAC resistivo donde los datos que llegan de la RAM (a través del buffer 74ls245) pasan a cada una de las resistencias para así formar una red resistiva que dará forma a la señal, según los datos entregado.

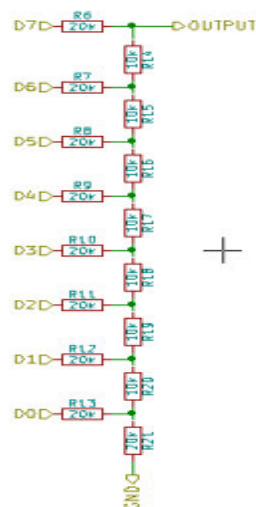


Figura 39. DAC resistivo
Fuente: Elaboración propia

Acondicionador de señal

Aquí la señal de salida del DAC pasa por dos procesos, uno es el filtrado del nivel de DC, y el otro es la reducción de la amplitud, para luego con un potenciómetro poder regular su amplitud. El filtrado del nivel de DC se logra mediante un sencillo filtro RC, pasa altas, con frecuencia de corte de 0.5Hz.

En la Figura 40 se puede observar ambos procesos, desde la etapa de entrada de la señal hasta su salida

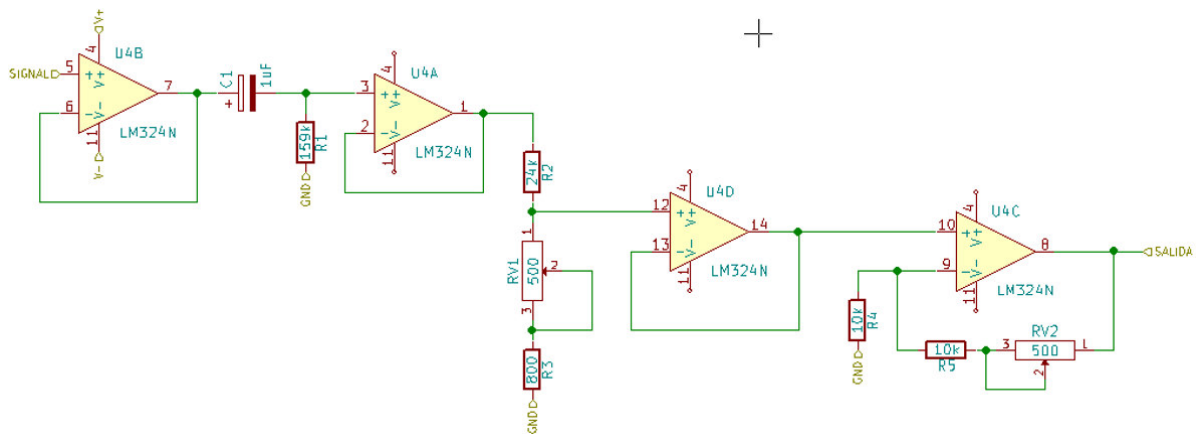


Figura 40. Acondicionar de señal

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 41 se muestra una comparación, siendo la forma de onda en azul la señal a la salida del DAC, positivo en todo momento. Y la forma de onda en rojo luego del filtrado de la componente de DC de la señal, volviéndose así una señal bipolar.

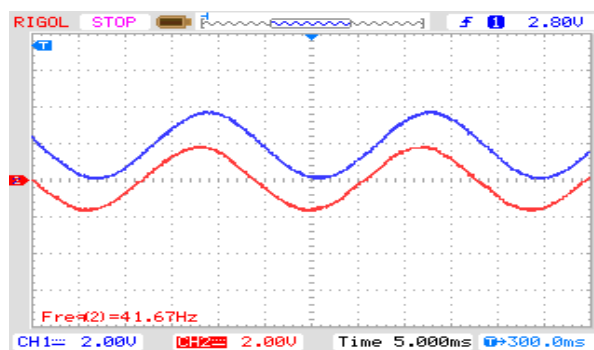


Figura 41. Comparación de la salida del DAC y el filtrado de la señal

Fuente: Elaboración propia

La reducción del nivel de amplitud se logró con un divisor de tensión. Luego la salida es amplificada, y el control se hace con un potenciómetro conectado al opamp U4C en configuración de amplificador no inversor.

En la Figura 42 podemos observar que la señal en azul se atenuada aproximadamente a 100mV. Y la señal en rojo luego de amplificada con el potenciómetro de control de amplitud.

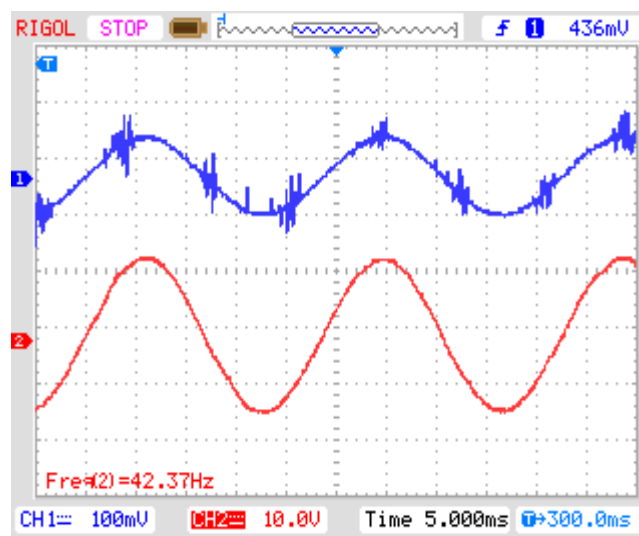


Figura 42. Proceso de amplificación usando el potenciómetro de control de amplitud
Fuente: Elaboración propia

Fuente de alimentación

El equipo funciona directamente con 220v AC de la toma de corriente. Posee dos módulos conversores AC/DC que convierten el voltaje AC de 220v a 5v DC cada uno. Luego cada voltaje de 5v es elevado hasta 15v DC con uso del módulo step-up XL - 6009. Ambos son conectados en serie para obtener así un voltaje positivo y negativo de ± 15 v DC para la alimentación de los amplificadores de acondicionamiento y salida de señal. Además, antes de la elevación de voltaje, se toman los 5v DC para la alimentación del microcontrolador, la memoria RAM y la circuitería TTL. En la Figura 43 se muestra el diagrama general.

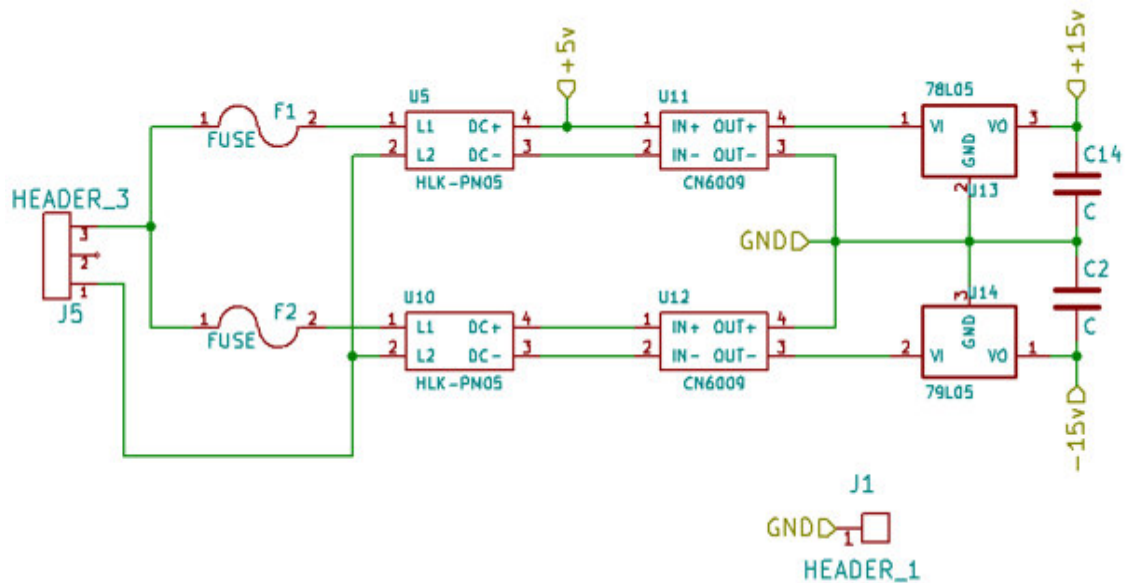


Figura 43. Esquema de la fuente de alimentación

Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento

El principio de funcionamiento es el siguiente:

Al encenderse el equipo la pantalla muestra las formas de onda disponibles para seleccionar, tenemos la señal senoidal, cuadrada, diente de sierra y arbitraria. Como se puede apreciar en la Figura 44.

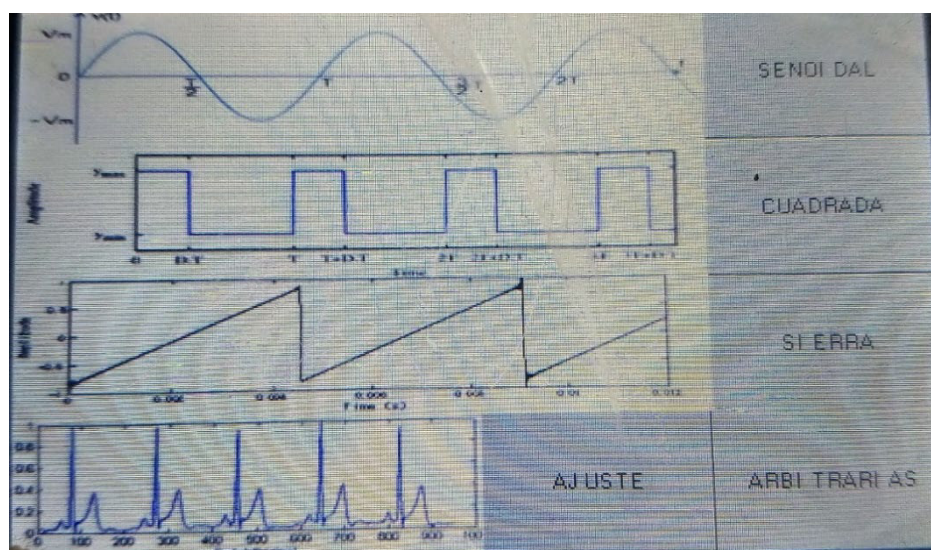


Figura 44. Interfaz del generador de funciones arbitrarias con las funciones mostradas

Fuente: Elaboración propia

Al seleccionar alguna de las opciones de forma de onda, el microcontrolador realiza un algoritmo para entregar las muestras grabadas en su memoria interna, dependiendo de la señal seleccionada, uno a uno hacia la memoria RAM estática. Pasando cada uno de los 200 bytes de muestras a la memoria RAM.

A partir de aquí la señal es generada con la memoria RAM y el reloj interno, teniendo la señal de salida una frecuencia igual a $\frac{F * \text{Clock}}{200}$, es decir si queremos una frecuencia de salida de 60 Hertz, entonces el reloj interno tendrá que tener una frecuencia de reloj de $60 \times 200 = 1200 \text{ Hz}$.

Fabricación del generador de funciones arbitrarias.

Una vez terminado el diseño se continuó con la implementación, como primer paso se realizó la impresión de la arquitectura esquemática del generador de funciones arbitrarias para ser pasado a la placa de fibra de vidrio, tal como se observa en la Figura 45.

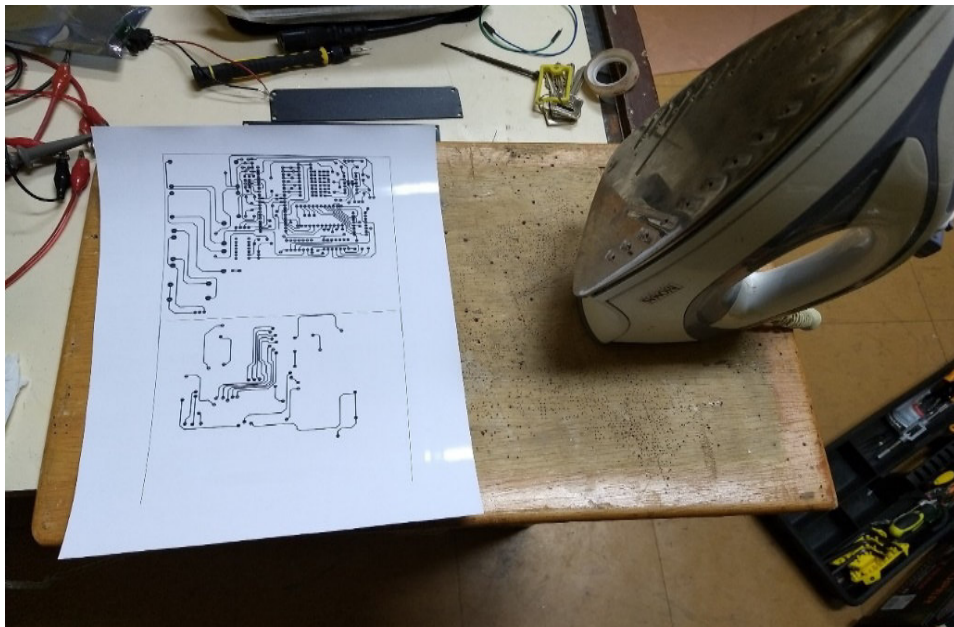


Figura 45. Grabado de la PCB mediante el método de la plancha
Fuente: Elaboración propia

Terminado el proceso de decapado de las pistas conductoras en la tarjeta electrónica mediante el ácido corrosivo, se pasó a soldar todos los componentes electrónicos, usando un cautín y estaño comercial, tal como se puede apreciar en la Figura 46

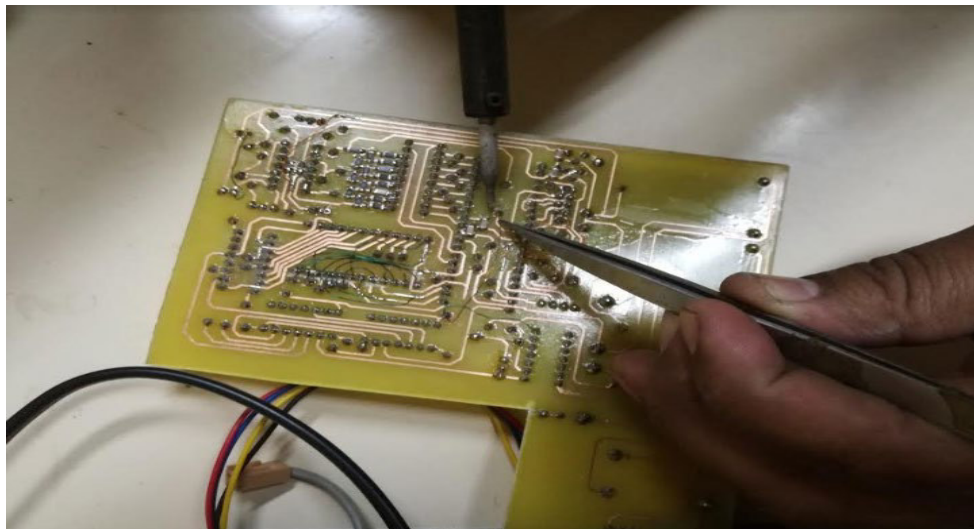


Figura 46. Soldadura de los componentes electrónicos para el acabo final de la tarjeta electrónica.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47 se puede apreciar como quedo fijada de la pantalla TFT Nextion en la caja de aluminio.

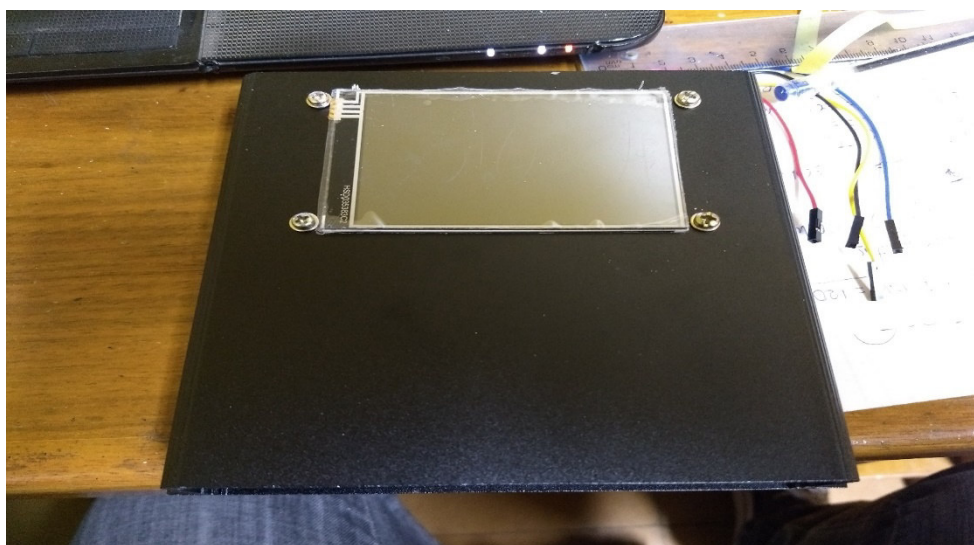


Figura 47. Pantalla TFT Nextion insertada en la caja
Fuente: Elaboración propia

Finalmente teniendo terminada la tarjeta electrónica y fijada la pantalla TFT Nextion se realiza la grabación de nuestro código en “C” en el microcontrolador atmega32, como se puede apreciar en la Figura 48.



Figura 48. Grabación del programa en el microcontrolador atmega32 y prueba de la pantalla
Fuente: Elaboración propia

Pruebas de funcionamiento del generador de funciones arbitrarias

Una vez terminado de ensamblar todos los componentes e insertarlos dentro de la caja de aluminio se realizó las pruebas usando un osciloscopio Tektronix conectado a la salida de nuestro generador. En la Figura 49 se puede observar la forma de onda senoidal producida por nuestro generador de funciones arbitrarias.



Figura 49. Prueba de funcionamiento para la onda senoidal
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 50 se puede observar la forma de onda diente de sierra producida por nuestro generador de funciones arbitrarias.



Figura 50. Prueba de funcionamiento para la onda diente de sierra
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 51 se puede observar la forma de onda cuadrada producida por nuestro generador de funciones arbitrarias.



Figura 51. Prueba de funcionamiento para la onda cuadrada
Fuente: Elaboración propia

Costos de fabricación del generador de funciones arbitrarias

La Tabla 18 presenta los costos de los materiales utilizados en la realización de la implementación del generador de funciones arbitrarias.

Tabla 18

Costo de implementación del generador de funciones arbitrarias

Materiales	Cantidad	Subtotal (S/.)	Total (S/.)
Microcontrolador atmega32	1	50.00	50.00
Módulo Step down	2	30.00	60.00
Caja de aluminio	1	50.00	50.00
Resistencias SDM	200	0.25	50.00
Pantalla nextion	1	300.00	300.00
Conector molex chico de 4 pines	2	4.00	8.00
Regulador 7805, 7812, 7912	3	5.00	15.00
Buzzer 5v	1	4.00	4.00
Cristal 16MHz	1	5.00	5.00
Fusibles	5	2.00	8.00
Disipador para regulador	3	2.00	6.00
Encoder con botón central	1	2.00	2.00
Pulsador	2	2.00	4.00
74LS245 DIP	2	4.00	8.00
Memoria RAM HM6116P-3	1	20.00	20.00
74LS14 SMD	1	2.00	2.00
74LS74 SMD	1	2.00	2.00
Opamp TL074	2	5.00	10.00
Opamp TL072	2	5.00	10.00
74LS32 DIP	1	2.00	2.00
74LS08 DIP	1	2.00	2.00
CD4040 DIP	1	4.00	4.00
Potenciómetro 2MHz	2	1.00	2.00
Condensadores diversos	1	10.00	10.00
Fuentes de 12v – 1A	2	30.00	60.00
		Total	694.00

Nota: El presente cuadro es de elaboración propia.

Capítulo 4

Resultados y evaluación del sistema

Ensamblaje del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas en el Laboratorio de Fisiología de la Reproducción (LFR), Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Una vez concluidas las pruebas preliminares en laboratorio se trasladó el sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas al Laboratorio de Fisiología de la Reproducción donde se realizarán los estudios pertinentes, al ser este lugar un ambiente completamente estéril. Se deben seguir los protocolos de seguridad y limpieza establecidos en su reglamento general, donde destacan los siguientes puntos:

- Antes de ingresar al ambiente de trabajo, se debe contar con una bata blanca reglamentaria, guantes quirúrgicos, mascarilla de boca, gorro de gasa para evitar la caída del cabello y protectores para los zapatos.
- Todo equipo o herramientas deben ser previamente esterilizadas, para ello se usa alcohol de 70%.
- Finalmente, para garantizar un óptimo resultado de esterilización se utiliza una lámpara UV.

Es por ello que el trabajo de ensamblaje se realizó con los guantes quirúrgicos como se muestra en la Figura 52, se tiene que tener el más mínimo cuidado de no contaminar el ambiente donde se realizaran las pruebas, ya que los estudios involucran cultivos celulares, estos son muy propensos a contaminarse y dañarse.

Para garantizar que se cumpla en todo momento el factor de esterilidad se decidió en nuestro diseño que el sistema de control de la generación de campo magnético se encuentre

fuera de la incubadora, así se evita la apertura innecesaria de la puerta de esta, evitando una posible contaminación del exterior.

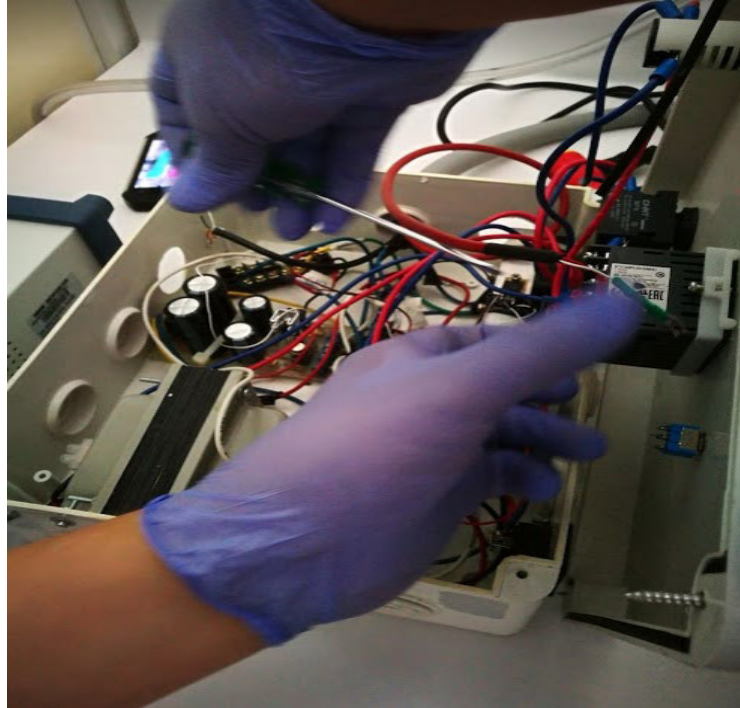


Figura 52. Ensamblaje del sistema de exposición a campos magnéticos
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la Figura 53 se muestra el sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas, listo para comenzar las pruebas.



Figura 53. Sistema de exposición a campos magnéticos listo para su uso
Fuente: Elaboración propia

Dada la complejidad de los trabajos de investigación que se realizan en el Laboratorio de Fisiología de la Reproducción, se nos solicitó la elaboración de dos sistemas de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas, ambos tienen que cumplir las mismas características técnicas de fabricación.

El primer sistema de exposición será destinado al “grupo experimental” o “grupo expuesto”. Es aquí donde los cultivos celulares serán irradiados por campos magnéticos a una frecuencia de 60 Hz.

El segundo sistema de exposición será destinado al “grupo sham” o “exposición ficticia”. Es aquí donde se simulará la exposición de campos magnéticos, los cultivos celulares en este ambiente no recibirán exposición alguna.

En la Figura 54 se muestra ambos sistemas dentro de la incubadora comercial



Figura 54. De izquierda a derecha: grupo expuesto y grupo de exposición simulada
Fuente: Elaboración propia

Medición de radiaciones no ionizantes provenientes del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas

En la Figura 55 se muestra la medición de campo magnético en el interior de nuestro sistema de exposición, esta prueba se realizó con el medidor de radiación no ionizante NBM-550 equipa con la sonda EHP-50F la cual es exclusiva para realizar pruebas en el rango de baja frecuencia (1 Hz to 400 kHz).

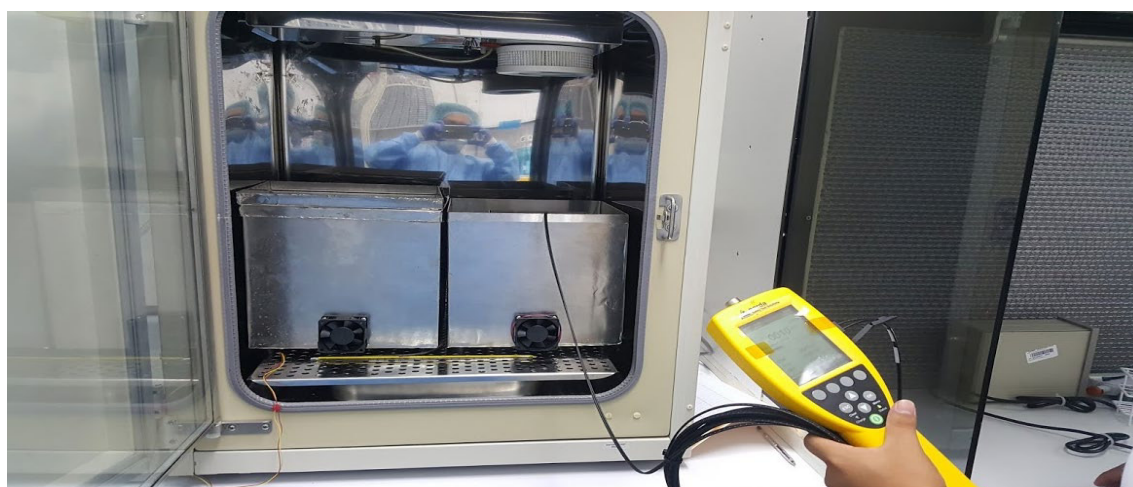


Figura 55. Medición de campo magnético en el interior del sistema de exposición
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 19 se muestra las principales características de la sonda EHP-50F, las especificaciones técnicas completas tanto de la sonda como del equipo NBM-550 y el certificado de calibración se muestran en el Apéndice C y Apéndice D respectivamente.

Tabla 19

Principales características de la sonda EHP-50F

Especificaciones técnicas	
Rango de frecuencia	1 Hz hasta 400 kHz
Rango dinámico	>105 dB
Rango de medición campo eléctrico (E)	5 mV/m hasta 100 kV/m
Rango de medición campo magnético (H)	0.3 nT hasta 10 mT
Rango de temperatura de operación	-20 °C hasta +55 °C
Estándares	2013/35/EU, ICNIRP 2010, ICNIRP 1998
Peso	550g
Dimensiones	92 mm x 92 mm x 109 mm

Nota: El presente cuadro es de elaboración propia.

Medición de la temperatura dentro del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas

Como se sabe la temperatura dentro del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas debe ser controlada en todo momento y no debe variar de 37 °C ya que los cultivos celulares podrían sufrir apoptosis. En la Figura 56 se muestra el control de dicho parámetro mediante el controlador de temperatura Schneider al cual se encuentra conectado el sensor Pt100, mientras en la Figura 57 se hace contraste a dicho valor usando un multímetro Fluke 179 equipado con un sensor de termocupla.

En el caso del valor obtenido utilizando el sensor Pt100 se puede observar que nos da 37.7 °C teniendo un error de $\pm 1^\circ\text{C}$ según las especificaciones técnicas proporcionadas por el fabricante, entonces podemos concluir que la temperatura tiene un valor real de aproximadamente 37°C

Mientras en el caso del sensor utilizado en el multímetro Fluke 179 se puede observar que el valor de temperatura es de 37 °C, este equipo electrónico se encuentra actualmente calibrado, por ellos la medición es confiable y veras.

Se garantiza que los estudios, que se realizaran utilizando el sistema de exposición cumplen con todos los estándares técnicos para este tipo de experimentos.

También se corrobora que se está cumpliendo las condiciones de diseño inicial, respecto al nivel de temperatura que se quería lograr.

Las pruebas dentro del Laboratorio de Fisiología de la Reproducción se llevaron a cabo en el lapso de un mes, incluso el sistema de exposición ya fue usado en un primer estudio biológico de investigación, pero no se entrará en detalles porque no es el objetivo de la tesis.

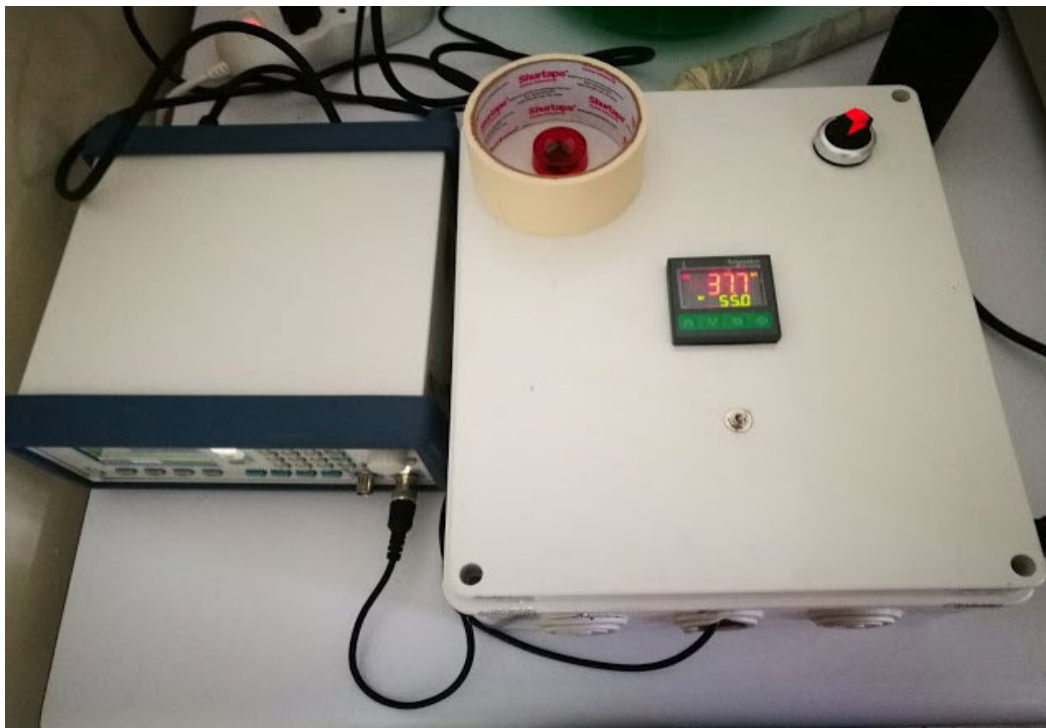


Figura 56. Medición de temperatura usando el sensor Pt100
Fuente: Elaboración propia



Figura 57. Medición de temperatura usando el Fluke 179
Fuente: Elaboración propia

Resultados de las pruebas de exposición a radiaciones no ionizantes producidos por el sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas.

El protocolo de medición que se siguió para realizar las mediciones consiste en acercar la sonda EHP-50F lo más próximo a los cultivos celulares, dicha sonda al ser de menor dimensión que la apertura donde se encontraran estos cultivos, encaja perfectamente, tal como se puede apreciar en la Figura 58. Y se comunica al equipo remoto NBM-550 mediante un cable de 2 hilos de fibra óptica tanto de transmisión como de recepción, tal como se puede apreciar en la Figura 59. Este equipo medidor de radiaciones no ionizantes se encuentra calibrado hasta el año 2019, los certificados de calibración se pueden ver en el Apéndice D.

La medición se realizó durante 6 minutos, cumpliendo los estándares proporcionados por la recomendación ICNIRP 2010.

Al contar con el cable óptico fue posible alejarnos fuera de la incubadora comercial manteniendo la puerta cerrada, esto garantiza que no existirá contaminación del medio y la pérdida de temperatura, ya que mientras más tiempo se dé la apertura de la puerta, se perderá la temperatura prevista dentro del sistema de exposición in-vitro de campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas.

Las pruebas se realizaron diariamente en un lapso de un mes, se fue dosificando la intensidad de campo magnético, recordar que este parámetro es directamente proporcional a la corriente en la entrada del sistema de portabobinas.

Era necesario comenzar desde lo mínimo para controlar la temperatura en todo momento, ya que a medida que aumenta la corriente de entrada va aumentar las vibraciones en el sistema de portabobinas y puede generar un aumento en la temperatura.

Al termino de las pruebas se garantizó que el nivel de temperatura permanece constante e invariable, cumpliéndose las características técnicas en el diseño inicial.

La correcta ventilación dentro de la incubadora y el óptimo funcionamiento de los ventiladores tanto de enfriamiento como de extracción de aire caliente, hacen posible que dicho parámetro permanezca en 37°C.



Figura 58. Sonda EHP-50F dentro de la apertura donde se colocarán los cultivos celulares
Fuente: Elaboración propia



Figura 59. Conexión al equipo remoto NBM-550 mediante el cable óptico
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 60 se muestra el valor de 326.5 uT de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $1.6 V_{pp}$. Este nivel de radiación no ionizante es para el “grupo de exposición”.



Figura 60. Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $1.6 V_{pp}$
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 61 se muestra el valor de 23 uT de campo magnético al interior del “grupo de exposición ficticia”. El valor se atenúa casi 15 veces respecto al valor del grupo de exposición, todo esto se logra gracias al blindaje con el micrometal.



Figura 61. Atenuación de casi 15 veces en el grupo de exposición ficticia
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 62 se muestra el valor de 439.4 uT de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 2.2 V_{pp} . Este nivel de radiación no ionizante es para el “grupo de exposición”.



Figura 62. Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 2.2 V_{pp}
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 63 se muestra el valor de 24 uT de campo magnético al interior del “grupo de exposición ficticia”. El valor se atenúa casi 19 veces respecto al valor del grupo de exposición, todo esto se logra gracias al blindaje con el micrometal.

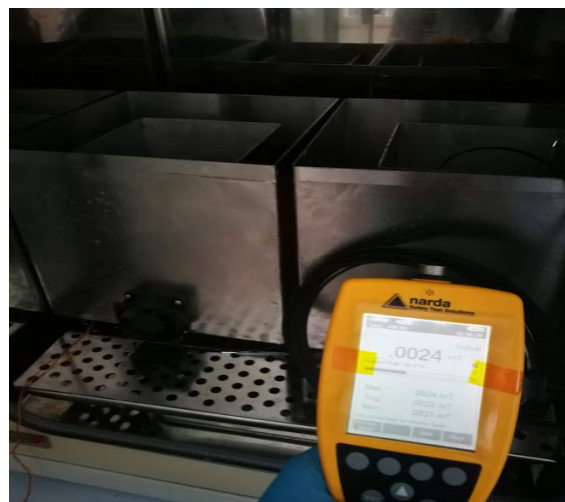


Figura 63. Atenuación de casi 19 veces en el grupo de exposición ficticia
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64 se muestra el valor de 524.6 uT de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $2.7 V_{pp}$. Este nivel de radiación no ionizante es para el “grupo de exposición”.



Figura 64. Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $2.7 V_{pp}$
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 65 se muestra el valor de 15 uT de campo magnético al interior del “grupo de exposición ficticia”. El valor se atenúa casi 35 veces respecto al valor del grupo de exposición, todo esto se logra gracias al blindaje con el micrometal.



Figura 65. Atenuación de casi 35 veces en el grupo de exposición ficticia
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 66 se muestra el valor de 826.6 μT de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 4.1 V_{pp} . Este nivel de radiación no ionizante es para el “grupo de exposición”.

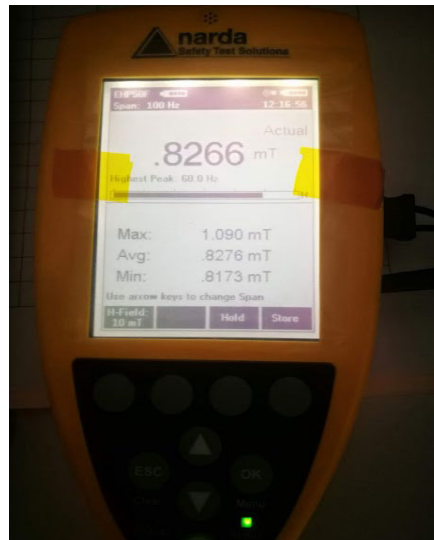


Figura 66. Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 4.1 V_{pp}
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 67 se muestra el valor de 10.71 μT de campo magnético al interior del “grupo de exposición ficticia”. El valor se atenúa casi 80 veces respecto al valor del grupo de exposición, todo esto se logra gracias al blindaje con el micrometal.



Figura 67. Atenuación de casi 80 veces en el grupo de exposición ficticia
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 68 se muestra el valor de 1012 uT de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 5 V_{pp}. Este nivel de radiación no ionizante es para el “grupo de exposición”.



Figura 68. Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de 5 V_{pp}
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 69 se muestra el valor de 12.01 uT de campo magnético al interior del “grupo de exposición ficticia”. El valor se atenúa casi 85 veces respecto al valor del grupo de exposición, todo esto se logra gracias al blindaje con el micrometal.



Figura 69. Atenuación de casi 85 veces en el grupo de exposición ficticia
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 70 se muestra el valor de 1324 μT de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $6.5 V_{pp}$. Este nivel de radiación no ionizante es para el “grupo de exposición”.



Figura 70. Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $6.5 V_{pp}$
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 71 se muestra el valor de 25.69 μT de campo magnético al interior del “grupo de exposición ficticia”. El valor se atenúa casi 52 veces respecto al valor del grupo de exposición, todo esto se logra gracias al blindaje con el micrometal.



Figura 71. Atenuación de casi 52 veces en el grupo de exposición ficticia
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 72 se muestra el valor de 2053 uT de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $10.5 V_{pp}$. Este nivel de radiación no ionizante es para el “grupo de exposición”.



Figura 72. Nivel de campo magnético producido por un voltaje de entrada de $10.5 V_{pp}$
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 73 se muestra el valor de 53.76 uT de campo magnético al interior del “grupo de exposición ficticia”. El valor se atenúa casi 39 veces respecto al valor del grupo de exposición, todo esto se logra gracias al blindaje con el micrometal.



Figura 73. Atenuación de casi 39 veces en el grupo de exposición ficticia
Fuente: Elaboración propia

Estos valores de radiaciones no ionizantes producidos por el sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas, son el resumen del total que se midieron, tal como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20

Resumen de pruebas utilizando el medidor de RNI NBM-550

Voltaje de entrada producido por el generador de funciones	Nivel de campo magnético	Atenuación gracias al blindaje con el micro metal
$V_{pp} = 1.6 \text{ v}$	326.5 uT	23 uT
$V_{pp} = 2.2 \text{ v}$	439.4 uT	24 uT
$V_{pp} = 2.7 \text{ v}$	524.6 uT	15 uT
$V_{pp} = 4.1 \text{ v}$	826.6 uT	10.71 uT
$V_{pp} = 5 \text{ v}$	1012 uT	12.01 uT
$V_{pp} = 6.5 \text{ v}$	1324 uT	25.69 uT
$V_{pp} = 10.5 \text{ v}$	2053 uT	53.76 uT

Nota: El presente cuadro es de elaboración propia.

Se trabajaron con estos niveles de radiaciones no ionizantes debido a que fueron solicitados por la encargada del Laboratorio de Fisiología de la Reproducción para poder realizar sus futuros estudios biológicos.

Como se puede apreciar el aumento del nivel de campo magnético se comporta de manera lineal respecto al valor de voltaje que entrega el generador de funciones, es decir mientras más aumenta el voltaje de entrada aumentará el nivel de campo magnético.

De estas mediciones se logra corroborar que el nivel de radiación no ionizante está conforme al diseño inicial planteado.

En el Apéndice E se muestra las mediciones totales recopiladas del equipo medidor de campos electromagnéticos NBM-550 equipado con la sonda EHP-50F.

Caracterización del campo magnético fuera de la incubadora comercial

Finalmente, para caracterizar el nivel de campo magnético fuera del medio de cultivo celular se realizó diferentes mediciones, en varios puntos del ambiente en donde se encuentra la incubadora comercial, teniendo un valor de 2 nT fuera de ella, este nivel de radiación no ionizante es despreciable al ser prácticamente nulo, en la Figura 74 se puede apreciar que dicha medición se realizó fuera de la incubadora, al costado derecho de esta, siendo el lugar más próximo. Se garantiza que, si realizamos alguna medición más lejana, el campo será menos a nuestro valor obtenido.



Figura 74. Medición de campo magnético fuera de la incubadora comercial

Fuente: Elaboración propia

Gracias al desarrollo del sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas automatizadas y controladas electrónicamente se podrá desarrollar estudios a nivel celular. En la actualidad el sistema ya se viene usando en estudios de exposición a campos magnéticos en células madre de alpaca.

Se espera plantear una línea de investigación para el otro año en temas relacionadas a la espermatogénesis y reproducción en mamíferos.

Capítulo 5

Conclusiones

- ❖ El sistema de exposición in-vitro a campos magnéticos de frecuencias extremadamente bajas cumple con la función de generar un nivel de radiación no ionizante en el rango de 5uT hasta 2mT, estos valores son controlados por el generador de funciones después de que la corriente (orden de los miliamperios) entregada por este, pase por la etapa de amplificación de potencia.
- ❖ Los dos ventiladores instalados dentro del sistema de exposición tienen un funcionamiento óptimo lo que garantiza que la temperatura en todo momento, para cualquier nivel de campo magnético se mantenga en 37 °C.
- ❖ Tanto el sistema de exposición como el control de temperatura se encuentran completamente caracterizados, para el caso de la caracterización del campo magnético en el interior de la incubadora comercial se usó el medidor de radiaciones no ionizantes Narda NBM – 550 y para la temperatura adicionalmente al sensor Pt100 se usó el multímetro Fluke 179 que cuenta con la función de medición de temperatura.
- ❖ El medidor de radiaciones no ionizantes Narda NBM – 550 usado para la recolección de datos, cuenta con certificado de calibración vigente hasta el 2019. Es por ello que las mediciones obtenidas por este equipo son altamente confiables y aceptadas por la comunidad científica internacional, a su vez se pueden garantizar el correcto desarrollo de futuros experimentos biológicos. Del mismo modo para la medición de temperatura se usó el multímetro Fluke 179, este cuenta con certificado de calibración, el cual solo es de un año.
- ❖ El nivel de radiación no ionizante en el interior del grupo de exposición simulada o grupo sham se encuentra muy por debajo en comparación al grupo de exposición, esta atenuación de campo magnético se logra gracias al blindaje con micro metal con los

que cuentan ambos sistemas. Teniendo un pico de 52 uT en el grupo sham para un valor de 2051 uT en el grupo de exposición. Ambos sistemas o grupos se encuentran en la misma incubadora comercial, así se logra optimizar los gastos ya que normalmente dichos sistemas se deberían encontrar en diferentes incubadoras.

- ❖ En el caso del generador de funciones arbitrarias se logró cumplir con todos los parámetros técnicos y de funcionamiento exigidos al igual que un generador de funciones comercial, el valor agregado de esta implementación es la opción arbitraria con la que cuenta y el precio está muy por debajo en comparación de los que se encuentran en el mercado.
- ❖ Se recomienda tener control absoluto de todos los parámetros técnicos que intervienen en el desarrollo correcto de estudios biológicos a nivel celular, si bien es cierto no se entro en detalles de como debería ser la forma adecuada de controlar todos estos parámetros, ya que el presente trabajo de tesis servirá para realizar una patente. Entre todos los parámetros el más importante es la caracterización de la temperatura, un incorrecto diseño y mala implementación puede generar la variación de la misma y puede producir apoptosis en los cultivos celulares.

Referencias bibliográficas

- Actualidad informática. (2011). *Espectro electromagnético* [Ilustración]. Recuperado de <http://www.marisolcollazos.es/noticias-informatica/?p=3759>
- Cardelli, E. Faba, A., Palotti, N., Pompei, M., & Tissi, F. (2011). Magnetic field exposure systems for the study of ELF effects. En IEEE. (Ed), 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON). Florence, Italy: University of Trento, Italy. Doi: 10.1109/EnergyCon.2012.6347735.
- Castelán, I. G. (1988). *Electricidad y magnetismo para estudiantes de Ciencias Biológicas*. México: Limusa.
- Centro de Servicio Gestión Ambiental de la UEN Proyectos y Servicios Asociados. (2011). *Líneas de Transmisión y Campos Electromagnéticos*. Costa Rica: ICE.
- Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes [ICNIRP]. (1998). *Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos variables en el tiempo (hasta 300 GHz)*. Health Phys, 74(4):494-522.
- Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes [ICNIRP]. (2003). *Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0 -100 kHz)*. Munich: Autor.
- Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes [ICNIRP]. (2010). *Recomendaciones para limitar la exposición a campos eléctricos, magnéticos variables en el tiempo (1 Hz- 100 kHz)*. Health Phys, 99(6): 818-836.
- Concha, G. (2010). *Interacción de campos electromagnéticos de extra baja frecuencia con el cuerpo humano. Mediciones de campo magnético en instalaciones de media tensión*.

- (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Santiago, Chile.
- Cruz, V. (2005). *La telefonía móvil y su salud*. Recuperado de http://www.who.int/peh-emf/publications/en/esp_mobphonehealthbk.pdf
- Cruz, V. (2016). Efectos de la exposición crónica a campos magnéticos de niveles existentes en la ciudad de Lima sobre la salud reproductiva de ratones machos (tesis doctoral). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera Metalúrgica y Geográfica, Lima, Perú.
- Electro FY. (2015). *Distribución de la energía eléctrica* [Ilustración]. Recuperado de <http://electrofy.blogspot.com/2015/04/distribucion-de-la-energia-electrica.html>
- Gottardi, G., Mesirca, P., Agostini, C., Remondini, D., & Bersani, F. (2003). A four coil exposure system (tetracoil) producing highly uniform magnetic field. *Bioelectromagnetics*, 13:401–411.
- Grupo Pandora (2001). *Campos eléctricos y magnéticos de 50 Hz* [Versión digital]. Recuperado de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1926/course/section/2221/lectura8.pdf>
- Guangying, Q., Xiaoxu, Z., Lihua, Z., Eriko, A., Aya, O., Mika, W., . . . Fumio, S. (2015). Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) exposure on B6C3F1 mice. *Environmental health and preventive medicine*, 287.
- Hito, K. (2018). Evaluación del efecto de la exposición crónica in vivo de campos magnéticos de baja frecuencia (cm-elf) sobre la actividad enzimática de acrosina en espermatozoides de ratones (*Mus Musculus*) (tesis de pre grado). Universidad

Católica De Santa María, Facultad de Ciencias Farmacéuticas, Bioquímicas y Biotecnológicas, Escuela profesional de Ingeniería Biotecnológica. Arequipa, Perú.

IARC (2002). *Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*. IARC Monographs on the Carcinogenic Risks to Humans. Volume 80. Lyon, IARC Press

Jazayeri, M., Shokrgozar, M. A., Haghighipour, N., Bolouri, B., Mirahmadi, F., & Farokhi, M. (2016). Effects of Electromagnetic Stimulation on Gene Expression of Mesenchymal Stem Cells and Repair of Bone Lesions. *Cell J*, 19(1), 34-44.

Jones, R-A. & Sheppard, A-R. (1992). An integrated ELF magneticfield generator and incubator for long-term in vitro studies. *Bioelectromagnetics*, 13:199–207.

Liu, Y., Liu, W., Liu, K., Ao, L., Cao, J., Zhong, J., & Liu, J. (2015). Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Affect the miRNA-Mediated Regulation of Signaling Pathways in the GC-2 Cell Line. *PLOS ONE*, 10(10), e0139949. doi: 10.1371/journal.pone.0139949

Livia, C. (2018). Diseño e implementación de una plataforma web para un sistema de monitoreo en área y evaluación de los campos electromagnéticos – aplicación en monitoreo en la ciudad de Lima (tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Académica Profesional de Ingeniería Electrónica, Lima, Perú.

Luo, Q., Yang, J., Zeng, Q., Zhu, X., Qian, Y., & Huang, H. (2006). 50-Hertz Electromagnetic Fields Induce gammaH2AX Foci Formation in Mouse Preimplantation Embryos In Vitro. *Biology Of Reproduction*, 75(5), 673-680. doi: 10.1095/biolreprod.106.052241.

Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Anuario ejecutivo de electricidad 2016*. Lima:

MINEM.

Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Evolución de indicadores del sector eléctrico 1995 - 2015*. Lima: MINEM.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC]. (2004, 19 agosto). Aprueban norma técnica sobre Protocolos de Medición de Radiaciones no Ionizantes [Resolución Ministerial]. Recuperado de

https://www.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacion/documentos/marco_normativo_radiaciones/R.M.%20N%C2%BA%20613-2004-MTC%2003.pdf

Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC]. (2005, 28 febrero). Aprueban norma técnica sobre Restricciones Radioeléctricas en Áreas de Uso Público [Resolución Ministerial]. Recuperado de

https://www.mtc.gob.pe/comunicaciones/regulacion_internacional/regulacion/documentos/marco_normativo_radiaciones/R.%20M.%20N%C2%BA%20120-2005-MTC%2003.pdf

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2014, Junio). Evaluación de radiaciones no ionizantes producidas por los servicios de telecomunicaciones y redes eléctricas en la provincia de Lima [Estudio]. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/Evaluaci%C3%B3n-de-Radiaciones-No-Ionizantes-producidas-por-los-Servicios-de-Telecomunicaciones.compressed.pdf>

- Misakian, M., Sheppard, A-R., Krause, D., Frazier, M-E., & Miller, DL. (1993). Biological, physical, and electrical parameters for in vitro studies with ELF magnetic fields: A primer. *Bioelectromagnetics Supplement*, 2:1–73
- Mullins, R-D., Sisken, J-E., Hejase, H-A., & Sisken, B-F. (1993). Design and characterization of a system for exposure of cultured cells to extremely low frequency electric and magnetic fields over a wide range of field strengths. *Bioelectromagnetics*, 14:173–86.
- Narda Safety Test Solutions. EFA-300 For Isotropic Measurement of Magnetic and Electric Fields User's Manual. Recuperado de https://www.narda-sts.com/en/service-and-support/product-literature/efa/#download_12335_1982
- Narda Safety Test Solutions. NBM-550 Measuring electric and magnetic fields User's Manual. Recuperado de <https://www.narda-sts.com/en/wideband-emf/amb-8059/>
- National Cancer Institute [NIH]. (2018). *Diccionario de cáncer*. NIH. Recuperado de <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/radiacion-ionizante>
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2007). *Environmental Health Criteria 238 - Extremely low frequency fields*. España: Autor
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. *Campos electromagnéticos (CEM) ¿Qué es el Proyecto CEM?* [sitio Web]. Ginebra: Autor, [acceso 31 de julio de 2018]. Disponible en http://www.who.int/peh-emf/project/EMF_Project/es/
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. *Campos electromagnéticos (CEM) ¿Qué son los campos electromagnéticos?* [sitio Web]. Ginebra: Autor, [acceso 17 de julio de 2018]. Disponible en <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/es/index3.html>

Organización Mundial de la Salud [OMS]. *Campos electromagnéticos (CEM)* –

Organizaciones internacionales [sitio Web]. Ginebra: Autor, [acceso 31 de julio de 2018]. Disponible en <http://origin.who.int/peh-emf/project/intorg/es/>

Presidencia de Consejo de Ministros. (2005, 2 febrero). *Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para Radiaciones No Ionizantes* [Decreto Supremo]. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2014/07/D.S.-N%C2%B0-010-2005-PCM-Est%C3%A1ndares-de-Calidad-Ambiental-para-Radiaciones-No-Ionizantes.pdf>

Protégete del móvil. (2018). Los campos electromagnéticos y el cuerpo humano. *Protégete del móvil*. Recuperado de <http://www.protegetedelmovil.com/los-campos-electromagneticos-y-el-cuerpo-humano/>

Qi, G., Zuo, X., Zhou, L., Aoki, E., Okamura, A., Watanebe, M., ... & Watanabe, H. (2015). Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) exposure on B6C3F1 mice. *Environmental health and preventive medicine*, 20(4), 287.

Rudolf Schuderers, J. (2003). *EMF Risk Assessment: “In Vitro” Research and Sleep Studies*. (Tesis Doctoral). SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, Suiza.

Sáiz, J., & Solano, M. A. (s.f). *Efectos biológicos del campo electromagnético*. Santander: Universidad de Cantabria.

Sismanidou, C., Reniers, A. C. F., & Zwamborn, A. P. M. (2011). Double solenoid ELF magnetic field exposure system for in-vitro studies. En IEEE. (Ed), 2011 10th *International Workshop on Biomedical Engineering*. Kos, Grecia: Universidad de Patras. Doi: 10.1109/IWBE.2011.6079009.

- UIT. (2018). *K.61 Guidance on measurement and numerical prediction of electromagnetic fields for compliance with human exposure limits for telecommunication installations*. Recuperado de <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.61-201801-I/en>
- UIT. (2011). *K.83 Supervisión de los niveles de intensidad del campo electromagnético*. Recuperado de <https://www.itu.int/rec/T-REC-K.83/es>
- Villalba, J., Ferreira, L., Arribas, E., Nájera, A., & Beléndez, A. (2015). Estudio experimental de la inducción electromagnética entre dos bobinas: Dependencia con la corriente eléctrica. *Revista Brasileira De Ensino De Física*, 37(1), 1313. doi: 10.1590/s1806-11173711697
- Williams C. D.; Marcov M. S.; Hardman W. E.; Cameron I. L. (2001). Therapeutic electromagnetic field effects on angiogenesis and tumor growth. *Anticancer Res* 21: 3887–3892.
- Wilson, B-W., Caputta, K., Stuchly, M-A., Saffer, J-D., Dabis, K-C., Calvin, E-W., Lloyd, G-W., Glenn, R-W., & M-A. Wilson. (1994) Design and fabrication of well confined uniform magnetic field exposure systems. *Bioelectromagnetics*, 15:563–577.
- Wu, Y., Ma, S., Peng, T., Teng, Z., Liang, X., & Guo, G. et al. (2014). Effects of Pulsed Electromagnetic Field on Differentiation of HUES-17 Human Embryonic Stem Cell Line. *International Journal Of Molecular Sciences*, 15(8), 14180-14190. doi: 10.3390/ijms150814180
- Yamazaki, K., Fujinami, H., Shigemitsu, T., & Nishimura, I. (2000). Low stray ELF magnetic field exposure system for in vitro study. *Bioelectromagnetics*, 24:125–133.

Yan, J., Don, G., Zhang, B., & Qi, i. (2010). Effects of extremely low-frequency magnetic field on growth and differentiation of human mesenchymal stem cells.

Electromagnetic Biology and Medicine, 29, 165–176.

Apéndice A: Recomendación ICNIRP 2010

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION



ICNIRP GUIDELINES

**FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING
ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz – 100 kHz)**

PUBLISHED IN: HEALTH PHYSICS 99(6):818-836; 2010

GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz TO 100 kHz)

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

INTRODUCTION

IN THIS document, guidelines are established for the protection of humans exposed to electric and magnetic fields in the low-frequency range of the electromagnetic spectrum. The general principles for the development of ICNIRP guidelines are published elsewhere (ICNIRP 2002). For the purpose of this document, the low-frequency range extends from 1 Hz to 100 kHz. Above 100 kHz, effects such as heating need to be considered, which are covered by other ICNIRP guidelines. However, in the frequency range from 100 kHz up to approximately 10 MHz protection from both, low frequency effects on the nervous system as well as high frequency effects need to be considered depending on exposure conditions. Therefore, some guidance in this document is extended to 10 MHz to cover the nervous system effects in this frequency range. Guidelines for static magnetic fields have been issued in a separate document (ICNIRP 2009). Guidelines applicable to movement-induced electric fields or time-varying magnetic fields up to 1 Hz will be published separately.

This publication replaces the low-frequency part of the 1998 guidelines (ICNIRP 1998). ICNIRP is currently revising the guidelines for the high-frequency portion of the spectrum (above 100 kHz).

SCOPE AND PURPOSE

The main objective of this publication is to establish guidelines for limiting exposure to electric and magnetic fields (EMF) that will provide protection against all established adverse health effects.

Studies on both direct and indirect effects of EMF have been assessed: direct effects result from direct interactions of fields with the body; indirect effects involve interactions

with a conducting object where the electric potential of the object is different from that of the body. Results of laboratory and epidemiological studies, basic exposure assessment criteria, and reference levels for practical hazard assessment are discussed, and the guidelines presented here are applicable to both occupational and public exposure.

The restrictions in these guidelines were based on established evidence regarding acute effects; currently available knowledge indicates that adherence to these restrictions protect workers and members of the public from adverse health effects from exposure to low frequency EMF. The epidemiological and biological data concerning chronic conditions were carefully reviewed and it was concluded that there is no compelling evidence that they are causally related to low-frequency EMF exposure.

These guidelines do not address product performance standards, which are intended to limit EMF emissions from specific devices under specified test conditions, nor does the document deal with the techniques used to measure any of the physical quantities that characterize electric, magnetic and electromagnetic fields. Comprehensive descriptions of instrumentation and measurement techniques for accurately determining such physical quantities may be found elsewhere (IEC 2004, 2005a; IEEE 1994, 2008).

Compliance with the present guidelines may not necessarily preclude interference with, or effects on, medical devices such as metallic prostheses, cardiac pacemakers and implanted defibrillators and cochlear implants. Interference with pacemakers may occur at levels below the recommended reference levels. Advice on avoiding these problems is beyond the scope of the present document but is available elsewhere (IEC 2005b).

These guidelines will be periodically revised and updated as advances are made in the scientific knowledge concerning any aspect relevant for limiting exposure of low frequency time-varying electric and magnetic fields.

QUANTITIES AND UNITS

Whereas electric fields are associated only with the presence of electric charge, magnetic fields are the result

* ICNIRP Secretariat, c/o Gunde Ziegelberger, c/o Bundesamt für Strahlenschutz, Ingolstaedter Landstrasse 1, 85764 Oberschleissheim, Germany.

For correspondence or reprints contact info@icnirp.org.
(Manuscript accepted 15 June 2010)

0017-9078/10/0

Copyright © 2010 Health Physics Society

DOI: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86

of the physical movement of electric charge (electric current). An electric field, E , exerts a force on an electric charge and is expressed in volts per meter (V m^{-1}). Similarly, magnetic fields can exert physical forces on electric charges, if such charges are in motion and/or the magnetic field varies with time. Electric and magnetic fields have both magnitude and direction (i.e., they are vectors). A magnetic field can be specified in two ways—as magnetic flux density, B , expressed in tesla (T), or as magnetic field strength, H , expressed in ampere per meter (A m^{-1}). The two quantities are related by the expression:

$$B = \mu H \quad (1)$$

where μ is the constant of proportionality (the magnetic permeability); in vacuum and air, as well as in non-magnetic (including biological) materials, μ has the value $4\pi \times 10^{-7}$ when expressed in Henry per meter (H m^{-1}). Thus, in describing a magnetic field for protection purposes, only one of the quantities B or H needs to be specified.

Exposure to time-varying EMF results in internal electric fields and in body currents and energy absorption in tissues that depend on the coupling mechanisms and the frequency involved. The internal electric field E_i and current density J are related by Ohm's Law:

$$J = \sigma E_i \quad (2)$$

where σ is the electrical conductivity of the medium. The dosimetric quantities used in these guidelines are as follows:

- electric field E_i ; and
- Current I .

A general summary of EMF and dosimetric quantities and units used in these guidelines is provided in Table 1.

SCIENTIFIC BASIS FOR LIMITING EXPOSURE

These guidelines for limiting exposure have been developed following a thorough review of the published

scientific literature. Well established criteria were used to evaluate the scientific validity of the methodology, results and conclusions of reported findings. Only effects for which there was reliable scientific evidence were used as the basis for the exposure restrictions.

Biological effects of exposure to low frequency electromagnetic fields have been reviewed by the International Agency for Research on Cancer (IARC), ICNIRP, and the World Health Organization (WHO) (IARC 2002; ICNIRP 2003a; WHO 2007a) and national expert groups. Those publications provided the scientific basis for these guidelines.

As detailed below, the basis for the guidelines is two-fold: Exposure to low-frequency electric fields may cause well-defined biological responses, ranging from perception to annoyance, through surface electric-charge effects. In addition, the only well established effects in volunteers exposed to low frequency magnetic fields are the stimulation of central and peripheral nervous tissues and the induction in the retina of phosphenes, a perception of faint flickering light in the periphery of the visual field. The retina is part of the CNS and is regarded as an appropriate, albeit conservative, model for induced electric field effects on CNS neuronal circuitry in general.

In view of the uncertainty inherent in the scientific data, reduction factors have been applied in establishing the exposure guidelines. For details see ICNIRP 2002.

Coupling mechanisms between fields and the body

Human and animal bodies significantly perturb the spatial distribution of a low frequency electric field. At low frequencies, the body is a good conductor, and the perturbed field lines external to the body are nearly perpendicular to the body surface. Oscillating charges are induced on the surface of the exposed body and these produce currents inside the body. Key features of dosimetry for exposure of humans to low frequency electric fields include:

- the electric field induced inside the body is considerably smaller than the external electric field, e.g., five to six orders of magnitude at 50–60 Hz;
- for a given external electric field, the strongest fields are induced when the human body is in perfect contact with the ground through the feet (electrically grounded), and the weakest induced fields are for the body insulated from the ground (in “free space”);
- the total current flowing in a body in perfect contact with ground is determined by the body size and shape (including posture) rather than tissue conductivity;
- the distribution of induced currents across the various organs and tissues is determined by the conductivity of those tissues; and

Table 1. Quantities and corresponding SI units used in these guidelines.

Quantity	Symbol	Unit
Conductivity	σ	Siemens per meter (S m^{-1})
Current	I	Ampere (A)
Current density	J	Ampere per square meter (A m^{-2})
Frequency	f	Hertz (Hz)
Electric field strength	E	Volt per meter (V m^{-1})
Magnetic field strength	H	Ampere per meter (A m^{-1})
Magnetic flux density	B	Tesla (T)
Magnetic permeability	μ	Henry per meter (H m^{-1})
Permittivity	ϵ	Farad per meter (F m^{-1})

- there is also an indirect effect, where the current in the body is produced by contact with a conductive object located in an electric field.

For magnetic fields, the permeability of tissue is the same as that of air, so the field in tissue is the same as the external field. Human and animal bodies do not significantly perturb the field. The main interaction of magnetic fields is the Faraday induction of electric fields and associated currents in the tissues. Electric fields may also be induced by movement in a static magnetic field. Key features of dosimetry for exposure of humans to low frequency magnetic fields include:

- for a given magnetic field strength and orientation, higher electric fields are induced in the bodies of larger people because the possible conduction loops are larger;
- the induced electric field and current depend on the orientation of the external magnetic field to the body. Generally induced fields in the body are greatest when the field is aligned from the front to the back of the body, but for some organs the highest values are for different field alignments;
- the weakest electric fields are induced by a magnetic field oriented along the principal body axis; and
- the distribution of the induced electric field is affected by the conductivity of the various organs and tissues.

Conclusions from the current scientific literature

Neurobehavior. Exposure to low-frequency electric fields causes well-defined biological responses, ranging from perception to annoyance, through surface electric-charge effects (Reilly 1998, 1999). Thresholds for direct perception by the most sensitive 10% of volunteers at 50–60 Hz ranged between 2 and 5 kV m⁻¹ and 5% found 15–20 kV m⁻¹ annoying. The spark discharge from a person to ground is found to be painful to 7% of volunteers in a field of 5 kV m⁻¹, whereas it would be painful to about 50% in a 10 kV m⁻¹ field. Thresholds for the spark discharge from a charged object through a grounded person depend on the size of the object and therefore require individual assessment.

The responsiveness of electrically excitable nerve and muscle tissue to electric stimuli including those induced by exposure to low-frequency EMFs has been well established for many years (e.g., Reilly 2002; Saunders and Jefferys 2007). Myelinated nerve fibers of the human peripheral nervous system have been estimated to have a minimum threshold value of around 6 V_{peak} m⁻¹ (Reilly 1998, 2002), based on theoretical calculation using a nerve model. However, peripheral nerve stimulation induced during volunteer exposure to

the switched gradient magnetic fields of magnetic resonance (MR) systems suggested that the threshold for perception may be as low as about 2 V m⁻¹ (Nyenhuys et al. 2001), based on calculations using a homogeneous human phantom model. A more accurate calculation of the electric fields induced in the tissues of a heterogeneous human model based on data from the above MR study has been carried out by So et al. (2004). These authors estimated the minimum threshold for peripheral nerve stimulation of between about 4–6 V m⁻¹, based on the assumption that stimulation took place in the skin or subcutaneous fat. With stronger stimuli, discomfort and then pain ensue; the lowest percentile for intolerable stimulation is approximately 20% above the median threshold for perception (ICNIRP 2004). Myelinated nerve fibers of the central nervous system (CNS) can be stimulated by electric fields induced during transcranial magnetic stimulation (TMS); the pulsed fields induced in cortical tissue during TMS are quite high (>100 V m⁻¹_{peak}), although theoretical calculation suggests that minimum stimulation threshold values may be as low as ~10 V m⁻¹_{peak} (Reilly 1998, 2002). For both sets of nerves, thresholds rise above around 1–3 kHz due to the progressively shorter time available for the accumulation of electric charge on the nerve membrane and below about 10 Hz due to the accommodation of a nerve to a slowly depolarizing stimulus.[†]

Muscle cells are in general less sensitive to direct stimulation than nerve tissue (Reilly 1998). Cardiac muscle tissue deserves particular attention because aberrant function is potentially life-threatening: however, ventricular fibrillation thresholds exceed those for cardiac muscle stimulation by a factor of 50 or more (Reilly 2002), although this drops considerably if the heart is repeatedly excited during the vulnerable period of the cardiac cycle. Thresholds rise above about 120 Hz due to the much longer time-constant of muscle fibers compared with myelinated nerves.

The most robustly established effect of electric fields below the threshold for direct nerve or muscle excitation is the induction of magnetic phosphenes, the perception of faint flickering light in the periphery of the visual field, in the retinas of volunteers exposed to low frequency magnetic fields. The minimum threshold flux density is around 5 mT at 20 Hz, rising at higher and lower frequencies. In these studies, the phosphenes are thought to result from the interaction of the induced electric field with electrically excitable cells in the retina. This is formed as an outgrowth of the forebrain and can

[†] Accommodation does not occur for example in response to the low-frequency component of trapezoid or rectangular pulses with quick rise-times but low repetition frequencies such as those found in the switched gradient fields of MR systems.

be considered a good but conservative model of processes that occur in CNS tissue in general (Attwell 2003). The threshold for induced electric field strengths in the retina has been estimated to lie between about 50 and 100 mV m⁻¹ at 20 Hz, rising at higher and lower frequencies (Saunders and Jefferys 2007) although there is considerable uncertainty attached to these values.

The integrative properties of the nervous tissue of the CNS may render it, and therefore functions such as cognitive processes like memory, sensitive to the effects of these physiologically weak electric fields. Saunders and Jefferys (2002) suggested that the electrical polarization of neurons in the CNS by such weak electric fields might enhance the synchronization of active groups of neurons and affect the recruitment of adjacent non-active neurons, thereby influencing overall nerve cell excitability and activity. *In vitro* evidence from studies using brain slices suggests that minimum thresholds for these effects lie below frequencies of ~100 Hz and may be as low as 100 mV m⁻¹ (Saunders and Jefferys 2007).

Two research groups have investigated the effects of weak electric fields applied directly to the head via electrodes[‡] on brain electrical activity and function in humans. One group (Kanai et al. 2008) reported that stimulation of the visual cortex induced the perception of cortical phosphenes (similar in appearance to phosphenes induced in the retina) when the stimulus frequency was characteristic for visual cortical activity either in dark conditions (around 10 Hz) or in light conditions (around 20 Hz) but not at higher or lower frequencies. The other group (Pogosyan et al. 2009) applied a 20 Hz signal to the motor cortex of volunteers during the performance of a visuo-motor task and found a small but statistically significant slowing of hand movement during task performance, which was consistent with an increased synchronization of 20 Hz motor cortex activity. No effect was seen at a lower stimulus frequency. In summary, both groups of authors found that 10–20 Hz electric fields, above the threshold for retinal phosphenes, can interact with ongoing rhythmic electrical activity in the visual and motor cortices and slightly affect visual processing and motor co-ordination, carrying the implication that 10–20 Hz EMF-induced electric fields of sufficient magnitude may have similar effects.

However, the evidence for other neurobehavioral effects on brain electrical activity, cognition, sleep, and mood in volunteers exposed to low frequency EMFs is much less clear (Cook et al. 2002, 2006; Crasson 2003; ICNIRP 2003a; Barth et al. 2010). Generally, such

studies have been carried out at exposure levels at or below about 1–2 mT; i.e., below those required to induce the effects described above, and have produced evidence of subtle and transitory effects at most. The conditions necessary to elicit such responses are not well defined at present.

Some people claim to be hypersensitive to EMFs in general. However, the evidence from double-blind provocation studies suggests that the reported symptoms are unrelated to EMF exposure (Rubin et al. 2005; WHO 2007a).

There is only inconsistent and inconclusive evidence that exposure to low-frequency electric and magnetic fields causes depressive symptoms or suicide (WHO 2007a).

In animals, the possibility that exposure to low frequency fields may affect neurobehavioral functions has been explored from a number of perspectives using a range of exposure conditions. Few effects have been established. There is convincing evidence that low-frequency electric fields can be detected by animals, most likely as a result of surface charge effects, and may elicit transient arousal or mild stress. Other possible field-dependent changes are less well defined (WHO 2007a).

Thus, the perception of surface electric charge, the direct stimulation of nerve and muscle tissue and the induction of retinal phosphenes are well established and can serve as a basis for guidance. In addition, there is also indirect scientific evidence that brain functions such as visual processing and motor co-ordination can be transiently affected by induced electric fields. However, the evidence from other neurobehavioral research in volunteers exposed to low frequency electric and magnetic fields is not sufficiently reliable to provide a basis for human exposure limits.

Neuroendocrine system. The results of volunteer studies as well as residential and occupational epidemiological studies suggest that the neuroendocrine system is not adversely affected by exposure to 50–60 Hz electric or magnetic fields. This applies particularly to circulating levels of specific hormones, including melatonin released by the pineal gland, and to a number of hormones involved in the control of body metabolism and physiology released by the pituitary gland. Most laboratory studies of the effects of 50–60 Hz exposure on night-time melatonin levels in volunteers found no effect when care was taken to control possible confounding (WHO 2007a).

From the large number of animal studies investigating the effects of 50–60 Hz electric and magnetic fields on rat pineal and serum melatonin levels, some reported

[‡] Transcranial AC stimulation or tACS is applied at levels below local skin perception thresholds.

that exposure resulted in night-time suppression of melatonin, while other studies did not. In seasonally breeding animals, the evidence for an effect of exposure to 50–60 Hz fields on melatonin levels and melatonin-independent reproductive status is predominantly negative (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). No convincing effect on melatonin levels has been seen in a study of non-human primates chronically exposed to 50–60 Hz fields.

No consistent effects have been seen in the stress-related hormones of the pituitary-adrenal axis in a variety of mammalian species, with the possible exception of short-lived stress following the onset of low frequency electric-field exposure at levels high enough to be perceived (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Similarly, while few studies have been carried out, mostly negative or inconsistent effects have been seen in the levels of growth hormone and hormones involved in controlling metabolic activity or associated with the control of reproduction and sexual development.

Overall, these data do not indicate that low frequency electric and/or magnetic fields affect the neuroendocrine system in a way that would have an adverse impact on human health.

Neurodegenerative disorders. It has been hypothesized that exposure to low frequency fields is associated with several neurodegenerative diseases. For Parkinson's disease and multiple sclerosis the number of studies has been small and there is no evidence for an association between low frequency exposure and these diseases. For Alzheimer's disease and amyotrophic lateral sclerosis (ALS) more studies have been published. Some of these reports suggest that people employed in electrical occupations might have an increased risk for ALS (Kheifets et al. 2009). So far, no biological mechanism has been established which can explain this association, although it could have arisen because of confounders related to electrical occupations, such as electric shocks. Furthermore, studies using more sophisticated exposure assessment methods, e.g., job-exposure matrices, have generally not observed increased risks (Kheifets et al. 2009). For Alzheimer's disease, results are inconsistent. Strongest associations have been found in clinic based studies with a large potential for selection bias, but increased risks have also been observed in some, but not all, population based studies. Subgroup analyses within studies strengthen the impression of inconsistent data (Kheifets et al. 2009). Statistical heterogeneity between study results speaks against pooling of available results, although such attempts have been made (Garcia et al. 2008). In addition, there is some evidence for publication bias. Control of potential confounding from other occupational exposures has generally not been made. So far only one residential

study is available, indicating an increased risk for Alzheimer's disease after long-term exposure, but based on very small numbers of cases (Huss et al. 2009).

The studies investigating the association between low frequency exposure and Alzheimer's disease are inconsistent. Overall, the evidence for the association between low frequency exposure and Alzheimer's disease and ALS is inconclusive.

Cardiovascular disorders. Experimental studies of both short-term and long-term exposure indicate that, while electric shock is an obvious health hazard, other hazardous cardiovascular effects associated with low frequency fields are unlikely to occur at exposure levels commonly encountered environmentally or occupationally (WHO 2007a). Though various cardiovascular changes have been reported in the literature, the majority of effects are small, and the results have not been consistent within or between studies (McNamee et al. 2009). Most of the studies of cardiovascular disease morbidity and mortality have shown no association with exposure (Kheifets et al. 2007). Whether a specific association exists between exposure and altered autonomic control of the heart remains speculative. Overall, the evidence does not suggest an association between low frequency exposure and cardiovascular diseases.

Reproduction and development. Overall, epidemiological studies have not shown an association between human adverse reproductive outcomes and maternal or paternal exposure to low frequency fields. There is some limited evidence for increased risk of miscarriage associated with maternal magnetic field exposure, but this reported association has not been found in other studies and overall the evidence for such an association is poor.

Exposures to low frequency electric fields of up to 150 kV m^{-1} have been evaluated in several mammalian species, including studies with large group sizes and exposure over several generations; the results consistently show no adverse developmental effects (ICNIRP 2003a; WHO 2007a).

Low frequency magnetic field exposure of mammals does not result in gross external, visceral or skeletal malformations using fields up to 20 mT (Juutilainen 2003, 2005; WHO 2007a). Overall, the evidence for an association between low frequency and developmental and reproductive effects is very weak.

Cancer. A considerable number of epidemiological reports, carried out particularly during the 1980's and 90's, indicated that long term exposure to 50–60 Hz magnetic fields, orders of magnitude below the limits of

the 1998 ICNIRP exposure guidelines might be associated with cancer. While the first studies looked at childhood cancer in relation to magnetic fields, later research also investigated adult cancers. In general, the initially observed associations between 50–60 Hz magnetic fields and various cancers were not confirmed in studies designed to see whether the initial findings could be replicated. However, for childhood leukemia the situation is different. The research that followed the first study has suggested that there may be a weak association between the higher levels of exposure to residential 50–60 Hz magnetic fields and childhood leukemia risk, although it is unclear whether it is causal: a combination of selection bias, some degree of confounding and chance could explain the results (WHO 2007a). Two pooled analyses (Ahlbom et al. 2000; Greenland et al. 2000) indicate that an excess risk may exist for average exposures exceeding 0.3–0.4 μT , although the authors of those analyses cautioned strongly that their results cannot be interpreted as showing a causal relationship between magnetic fields and childhood leukemia.

At the same time, no biophysical mechanism has been identified and the experimental results from the animal and cellular laboratory studies do not support the notion that exposure to 50–60 Hz magnetic fields is a cause of childhood leukemia.

It should be noted that there is currently no adequate animal model of the most common form of childhood leukemia, acute lymphoblastic leukemia. Most studies report no effect of 50–60 Hz magnetic fields on leukemia or lymphoma in rodent models (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Several large-scale long-term studies in rodents have not shown any consistent increase in any type of cancer, including hematopoietic, mammary, brain, and skin tumors.

A substantial number of studies have examined the effects of 50–60 Hz magnetic fields on chemically-induced mammary tumors in rats (ICNIRP 2003a; WHO 2007a). Inconsistent results were obtained that may be due in whole or in part to differences in experimental protocols, such as the use of specific sub-strains. Most studies on the effects of 50–60 Hz magnetic field exposure on chemically-induced or radiation-induced leukemia/lymphoma models were negative. Studies of pre-neoplastic liver lesions, chemically-induced skin tumors, and brain tumors reported predominantly negative results.

Generally, studies of the effects of low frequency field exposure of cells have shown no induction of genotoxicity at fields below 50 mT (Crompton and Collins 2004; WHO 2007a). Overall, in contrast to the epidemiological evidence of an association between childhood leukemia and prolonged exposure to power

frequency magnetic fields, the animal cancer data, particularly those from large-scale lifetime studies, are almost universally negative. The data from cellular studies are generally supportive of the animal studies, though more equivocal.

Rationale for these recommended low frequency guidelines

ICNIRP addresses acute and chronic health effects and considers recent dosimetric developments in this guidance.

Acute effects. There are a number of well established acute effects of exposure to low-frequency EMFs on the nervous system: the direct stimulation of nerve and muscle tissue and the induction of retinal phosphenes. There is also indirect scientific evidence that brain functions such as visual processing and motor co-ordination can be transiently affected by induced electric fields. All these effects have thresholds below which they do not occur and can be avoided by meeting appropriate basic restrictions on electric fields induced in the body.

Following the recommendations made concerning guidelines on limits of exposure to static magnetic fields (ICNIRP 2009), ICNIRP considers that there are occupational circumstances where, with appropriate advice and training, it is reasonable for workers voluntarily and knowingly to experience transient effects such as retinal phosphenes and possible minor changes in some brain functions, since they are not believed to result in long-term or pathological health effects. Exposure of all parts of the body in these circumstances should be limited in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. ICNIRP notes the relatively narrow margin between peripheral nerve perception and pain thresholds; see above. For both types of nerves, thresholds rise above around 1–3 kHz due to the very short membrane time-constants resulting from myelination, and below about 10 Hz due to the accommodation to a slowly depolarizing stimulus.

Avoiding retinal phosphenes should protect against any possible effects on brain function. Phosphene thresholds are a minimum around 20 Hz and rise rapidly at higher and lower frequencies, intersecting with the thresholds for peripheral and central nerve stimulation at which point limits on peripheral nerve stimulation should apply. For workers who are not trained and who may be unaware and not in control of their exposure status the basic restriction is set at the phosphene threshold in order to avoid these transient but potentially disturbing effects of exposure. For members of the public, a reduction factor of 5 is applied to the phosphene threshold.

Exposure to low-frequency electric fields causes well-defined biological responses through surface electric-charge effects. Prevention of the painful effects of surface electric charge induced on the body by such exposure are addressed by the reference levels.

Chronic effects. The literature on chronic effects of low frequency fields has been evaluated in detail by individual scientists and scientific panels. WHO's cancer research institute, IARC (International Agency for Research on Cancer), evaluated low frequency magnetic fields in 2002 and classified them in category 2 B, which translates to "possibly carcinogenic to humans." The basis for this classification was the epidemiologic results on childhood leukemia.

It is the view of ICNIRP that the currently existing scientific evidence that prolonged exposure to low frequency magnetic fields is causally related with an increased risk of childhood leukemia is too weak to form the basis for exposure guidelines. In particular, if the relationship is not causal, then no benefit to health will accrue from reducing exposure.

Dosimetry. Historically, magnetic field models assumed that the body has a homogeneous and isotropic conductivity and applied simple circular conductive loop models to estimate induced currents in different organs and body regions. Electric fields induced by time varying electric and magnetic fields were computed by using simple homogeneous ellipsoid models. In recent years, more realistic calculations based on anatomically and electrically refined heterogeneous models (Xi and Stuchly 1994; Dimbylow 2005, 2006; Bahr et al. 2007) resulted in a much better knowledge of internal electric fields in the body from exposure to electric and magnetic fields.

The most useful dosimetric results for the purpose of these guidelines have been obtained from high resolution calculations of induced electric field with voxel sizes below 4 mm (Dimbylow 2005; Bahr et al. 2007; Hirata et al. 2009; Nagaoka et al. 2004). The maximum electric field is induced in the body when the external fields are homogeneous and directed parallel to the body axis (E-field) or perpendicular (H-field). According to those calculations, the maximum local peak electric field induced by a 50 Hz magnetic field in the brain is approximately 23–33 mV m⁻¹ per mT, depending on field orientation and body model. There is no conversion factor for peripheral nerve tissue available at present. Therefore, the skin, which contains peripheral nerve endings, was chosen as a worst-case target tissue. The electric field induced in the skin by such a field is approximately 20–60 mV m⁻¹ per mT. The maximum

local electric field induced by a 50 Hz electric field in the brain is approximately 1.7–2.6 mV m⁻¹ per kV m⁻¹, while in the skin it is approximately 12–33 mV m⁻¹ per kV m⁻¹.

In view of the uncertainties in the available dosimetry as well as the influence of body parameters in the derivation of reference levels, ICNIRP is taking a conservative approach in deriving reference levels from the basic restrictions.

GUIDELINES FOR LIMITING EMF EXPOSURE

Separate guidance is given for occupational exposures and exposure of the general public. Occupational exposure in these guidelines refers to adults exposed to time-varying electric, and magnetic fields from 1 Hz to 10 MHz at their workplaces, generally under known conditions, and as a result of performing their regular or assigned job activities. By contrast, the term general population refers to individuals of all ages and of varying health status which might increase the variability of the individual susceptibilities. In many cases, members of the public are unaware of their exposure to EMF. These considerations underlie the adoption of more stringent exposure restrictions for the public than for workers while they are occupationally exposed.

Addressing scientific uncertainty

All scientific data and their interpretation are subject to some degree of uncertainty. Examples are methodological variability and inter-individual, inter-species, and inter-strain differences. Such uncertainties in knowledge are compensated for by reduction factors.

There is, however, insufficient information on all sources of uncertainty to provide a rigorous basis for establishing reduction factors over the whole frequency range and for all modulation patterns. Therefore, the degree to which caution is applied in the interpretation of the available database and in defining reduction factors is to a large extent a matter of expert judgment.

Basic restrictions and reference levels

Limitations of exposure that are based on the physical quantity or quantities directly related to the established health effects are termed basic restrictions. In this guideline, the physical quantity used to specify the basic restrictions on exposure to EMF is the internal electric field strength E_i , as it is the electric field that affects nerve cells and other electrically sensitive cells.

The internal electric field strength is difficult to assess. Therefore, for practical exposure assessment purposes, reference levels of exposure are provided. Most

reference levels are derived from relevant basic restrictions using measurement and/or computational techniques but some address perception (electric field) and adverse indirect effects of exposure to EMF. The derived quantities are electric field strength (E), magnetic field strength (H), magnetic flux density (B) and currents flowing through the limbs (I_L). The quantity that addresses indirect effects is the contact current (I_C). In any particular exposure situation, measured or calculated values of any of these quantities can be compared with the appropriate reference level. Compliance with the reference level will ensure compliance with the relevant basic restriction. If the measured or calculated value exceeds the reference level, it does not necessarily follow that the basic restriction will be exceeded. However, whenever a reference level is exceeded it is necessary to test compliance with the relevant basic restriction and to determine whether additional protective measures are necessary.

BASIC RESTRICTIONS

The main objective of this publication is to establish guidelines for limiting EMF exposure that will provide protection against adverse health effects. As noted above, the risks come from transient nervous system responses including peripheral (PNS) and central nerve stimulation (CNS), the induction of retinal phosphenes and possible effects on some aspects of brain function.

In view of the considerations above for frequencies in the range 10 Hz to 25 Hz, occupational exposure should be limited to fields that induce electric field strengths in CNS tissue of the head (i.e., the brain and retina) of less than 50 mV m^{-1} in order to avoid the induction of retinal phosphenes. These restrictions should also prevent any possible transient effects on brain function. These effects are not considered to be adverse health effects; however, ICNIRP recognizes that they may be disturbing in some occupational circumstances and should be avoided but no additional reduction factor is applied. Phosphenes thresholds rise rapidly at higher and lower frequencies, intersecting with the thresholds for peripheral and central myelinated nerve stimulation at 400 Hz. At frequencies above 400 Hz, limits on peripheral nerve stimulation apply in all parts of the body.

Exposure in controlled environments, where workers are informed about the possible transient effects of such exposure, should be limited to fields that induce electric fields in the head and body of less than 800 mV m^{-1} in order to avoid peripheral and central myelinated nerve stimulation. A reduction factor of 5 has been applied to a stimulation threshold of 4 V m^{-1} in order to account for the uncertainties described above. Such restrictions rise above 3 kHz.

For the general public for CNS tissue of the head a reduction factor of 5 is applied, giving a basic restriction of 10 mV m^{-1} between 10 and 25 Hz. Above and below these values, the basic restrictions rise. At 1,000 Hz it intersects with basic restrictions that protect against peripheral and central myelinated nerve stimulation. Here, the reduction factor of 10 results in a basic restriction of 400 mV m^{-1} , which should be applied to the tissues of all parts of the body.

The basic restrictions are presented in Table 2 and Fig. 1.

Time averaging

ICNIRP recommends that the restrictions on internal electric fields induced by electric or magnetic fields including transient or very short-term peak fields be regarded as instantaneous values which should not be time averaged (see also section on non-sinusoidal exposure).

Spatial averaging of induced electric field

When restricting adverse effects of induced electric fields to nerve cells and networks, it is important to define the distance or volume over which the local induced electric field must be averaged. As a practical compromise, satisfying requirements for a sound biological basis and computational constraints, ICNIRP recommends determining the induced electric field as a vector average of the electric field in a small contiguous tissue volume of $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$. For a specific tissue, the 99th percentile value of the electric field is the relevant value to be compared with the basic restriction.

Table 2. Basic restrictions for human exposure to time-varying electric and magnetic fields.

Exposure characteristic	Frequency range	Internal electric field (V m^{-1})
Occupational exposure		
CNS tissue of the head	1–10 Hz	$0.5/f$
	10 Hz–25 Hz	0.05
	25 Hz–400 Hz	$2 \times 10^{-3}f$
	400 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.8
	3 kHz–10 MHz	$2.7 \times 10^{-4}f$
General public exposure		
CNS tissue of the head	1–10 Hz	$0.1/f$
	10 Hz–25 Hz	0.01
	25 Hz–1000 Hz	$4 \times 10^{-4}f$
	1000 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$
All tissues of head and body	1 Hz–3 kHz	0.4
	3 kHz–10 MHz	$1.35 \times 10^{-4}f$

Notes:

- f is the frequency in Hz.

- All values are rms.

- In the frequency range above 100 kHz, RF specific basic restrictions need to be considered additionally.

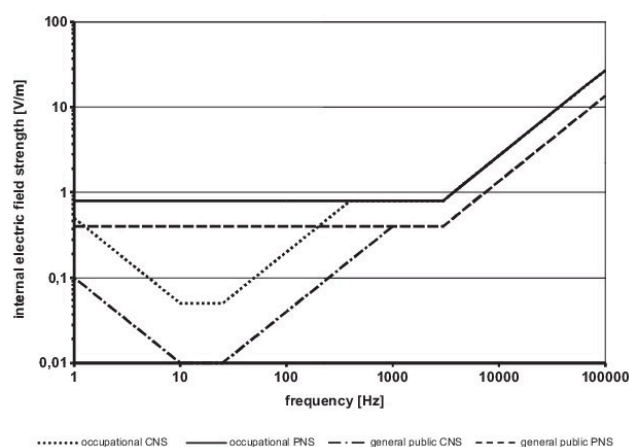


Fig. 1. Basic restrictions for general public and occupational exposure in terms of internal electric field strength concerning CNS and PNS effects.

Basically the electric field effects on neurons and other electrically excitable cells are local effects, but there are electrophysiological and practical dosimetric factors that constrain the minimum volume or distance. The major physical factor disturbing the function of neurons and neuronal networks is the voltage produced by the induced electric field over the membrane of the cell. For isolated nerve fibers aligned along the direction of the electric field (maximum coupling) this voltage is integrated from the electric field over the electrotonic distance varying from 2 to 7 millimeters for invertebrate nerves (Reilly 1998; Reilly and Diamant 2003). For myelinated nerve cells a good assumption for the integration distance is approximately 2 mm, which is the maximum inter-nodal distance between the nodes of Ranvier. These distances are relevant when considering stimulation thresholds to isolated nerve cells. In the case of sub-threshold weak electric field effects, such as retinal phosphenes, the collective “network” effect of numerous interacting nerve cells must be taken into account. The threshold of the effect is considerably lower than the stimulation threshold of isolated nerve cells, which is due to summation and integration of small, induced voltages in the synapses. It has been suggested that the averaging volume for the induced electric field should be based on minimum of 1,000 interacting cells, which is approximately 1 mm^3 in most nerve tissue (Jefferys 1994). Hence, a biologically reasonable averaging distance might extend from 1 to 7 mm. From a practical point of view, it is difficult to achieve satisfactory accuracy in the millimeter resolution computation of the induced electric field, and even more difficult to

measure it. Maximal values in one voxel in a specific tissue are prone to large stair-casing errors associated with sharp corners of the cubical voxel. A solution to obtain more stable peak approximations is based on choosing for the peak value a value representing the 99th percentile value of the induced field in a specific tissue. From the biological point of view however, this is a somewhat arbitrary choice because the peak value depends on the resolution. Another option for the spatial averaging is to define the local electric field as an average in a small volume or along a line segment (Reilly and Diamant 2003).

As a general rule the averaging volume should not extend beyond the boundary of the tissue except for tissues such as the retina and skin, which are too thin to cover the whole averaging cube. For the skin the same averaging volume of $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ can be assumed, and it may extend to the subcutaneous tissue. For the retina the averaging volume may extend to the tissues in front and behind it.

REFERENCE LEVELS

The reference levels are obtained from the basic restrictions by mathematical modeling using published data (Dimbylow 2005, 2006). They are calculated for the condition of maximum coupling of the field to the exposed individual, thereby providing maximum protection. Frequency dependence and dosimetric uncertainties were taken into account. The reference levels presented consider two distinct effects and approximate a combination of the induced electric fields in the brain,

relevant for CNS effects, and the induced electric fields in non-CNS tissues anywhere in the body, relevant for PNS effects (i.e., at 50 Hz, the factor used to convert the basic restriction for CNS effects to an external magnetic field exposure is 33 V m^{-1} per T, and for PNS effect 60 V m^{-1} per T. An additional reduction factor of 3 was applied to these calculated values to allow for dosimetric uncertainty).

In addition, the electric field reference level for occupational exposure up to 25 Hz includes a sufficient margin to prevent stimulation effects from contact currents under most practical conditions. Between 25 Hz and 10 MHz the reference levels are based on the basic restriction on induced electric fields only and might thus not provide a sufficient margin to prevent stimulation effects from contact currents under all possible conditions in that frequency band.

The electric field reference levels for general public exposure up to 10 MHz prevent adverse indirect effects (shocks and burns) for more than 90% of exposed individuals. In addition, the electric field reference levels for general public exposure up to 50 Hz include a sufficient margin to prevent surface electric-charge effects such as perception in most people.

Tables 3 and 4 summarize the reference levels for occupational and general public exposure, respectively, and the reference levels are illustrated in Figs. 2 and 3. The reference levels assume an exposure by a uniform (homogeneous) field with respect to the spatial extension of the human body.

Spatial averaging of external electric and magnetic fields

Reference levels have been determined for the exposure conditions where the variation of the electric or magnetic field over the space occupied by the body is relatively small. In most cases, however, the distance to

Table 4. Reference levels for general public exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).

Frequency range	E-field strength E (kV m^{-1})	Magnetic field strength H (A m^{-1})	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	5	$3.2 \times 10^3/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz–25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz–50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz–400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz–3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^3/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz–10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Notes:

- f in Hz.
- See separate sections below for advice on non sinusoidal and multiple frequency exposure.
- In the frequency range above 100 kHz, RF specific reference levels need to be considered additionally.

the source of the field is so close that the distribution of the field is non-uniform or localized to a small part of the body. In these cases the measurement of the maximum field strength in the position of space occupied by the body always results in a safe, albeit very conservative exposure assessment.

For a very localized source with a distance of a few centimeters from the body, the only realistic option for the exposure assessment is to determine dosimetrically the induced electric field, case by case. When the distance exceeds 20 cm, the distribution of the field becomes less localized but is still non-uniform, in which case it is possible to determine the spatial average along the body or part of it (Stuchly and Dawson 2002; Jokela 2007). The spatial average should not exceed the reference level. The local exposure may exceed the reference level but with an important provision that the basic restriction shall not be exceeded. It is the task of standardization bodies to give further guidance on the specific exposure situations where the spatial averaging can be applied. This guidance shall be based on well established dosimetry. The standardization bodies also may derive new reference levels for special types of non-uniform exposure.

Additivity of exposure to electric and magnetic fields

Each of the external electric and magnetic field induces an electric field component, which add vectorially in the tissue. In the case of the exposure analysis based on the external electric and magnetic fields, a conservative approach would be to assume that both the electrically and magnetically induced field components attain the maximum value in the same critical point at the same phase. This would imply that the exposures to the external electric and magnetic fields are additive (Cech et al. 2008). Such situations, however, are judged to be very

Table 3. Reference levels for occupational exposure to time-varying electric and magnetic fields (unperturbed rms values).

Frequency range	E-field strength E (kV m^{-1})	Magnetic field strength H (A m^{-1})	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	20	$1.63 \times 10^3/f^2$	$0.2/f^2$
8 Hz–25 Hz	20	$2 \times 10^3/f$	$2.5 \times 10^{-2}/f$
25 Hz–300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
300 Hz–3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2.4 \times 10^3/f$	$0.3/f$
3 kHz–10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}

Notes:

- f in Hz.
- See separate sections below for advice on non sinusoidal and multiple frequency exposure.
- To prevent indirect effects especially in high electric fields see chapter on "Protective measures."
- In the frequency range above 100 kHz, RF specific reference levels need to be considered additionally.

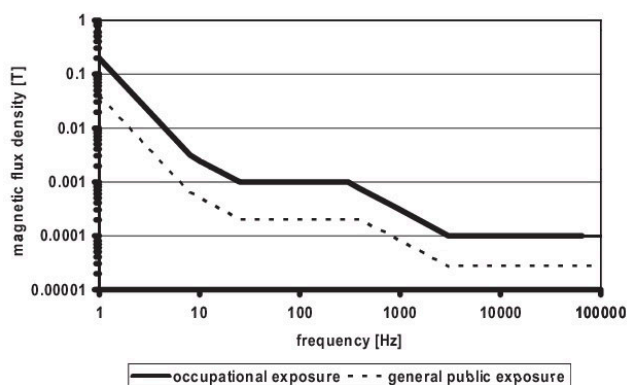


Fig. 2. Reference levels for exposure to time varying magnetic fields (compare Tables 3 and 4).

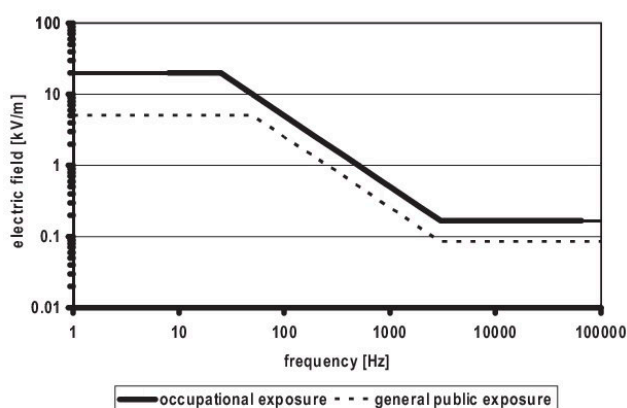


Fig. 3. Reference levels for exposure to time varying electric fields (compare Tables 3 and 4).

infrequent taking into account the great difference in the distribution of the electrically and magnetically induced electric fields.

REFERENCE LEVELS FOR CONTACT CURRENTS

Up to 10 MHz reference levels for contact current are given for which caution must be exercised to avoid shock and burn hazards. The point contact reference levels are presented in Table 5. Since the threshold contact currents that elicit biological responses in children are approximately one-half of those for adult men, the reference levels for contact current for the general public are set lower by a factor of 2 than the values for occupational exposure. It should be noted that the reference levels are not intended to prevent perception but to

Table 5. Reference levels for time-varying contact currents from conductive objects.

Exposure characteristics	Frequency range	Maximum contact current (mA)
Occupational exposure	Up to 2.5 kHz	1.0
	2.5–100 kHz	$0.4f$
	100 kHz–10 MHz	40
General public exposure	Up to 2.5 kHz	0.5
	2.5–100 kHz	$0.2f$
	100 kHz–10 MHz	20

Note: f is the frequency in kHz.

avoid painful shocks. Perception of contact current is not *per se* hazardous but could be considered as annoyance. Prevention of excess contact currents is possible by technical means.

SIMULTANEOUS EXPOSURE TO MULTIPLE FREQUENCY FIELDS

It is important to determine whether, in situations of simultaneous exposure to fields of different frequencies, these exposures are additive in their effects. The formulae below apply to relevant frequencies under practical exposure situations. For electrical stimulation, relevant for frequencies up to 10 MHz, internal electric fields should be added according to

$$\sum_{j=1}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_{i,j}}{E_{L,j}} \leq 1 \quad (3)$$

where $E_{i,j}$ is the internal electric field strength induced at frequency j , and $E_{L,j}$ is the induced electric field strength restriction at frequency j as given in Table 2.

For practical application of the basic restrictions, the following criteria regarding reference levels of field strengths should be applied:

$$\sum_{j=1}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_j}{E_{R,j}} \leq 1 \quad (4)$$

and

$$\sum_{j=1}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_j}{H_{R,j}} \leq 1 \quad (5)$$

where

- E_j = the electric field strength at frequency j ;
- $E_{R,j}$ = the electric field strength reference level at frequency j as given in Tables 3 and 4;
- H_j = is the magnetic field strength at frequency j ;
- $H_{R,j}$ = the magnetic field strength reference level at frequency j as given in Tables 3 and 4.

For limb current and contact current, respectively, the following requirements should be applied:

$$\sum_{j=1}^{10 \text{ MHz}} \frac{I_j}{I_{L,j}} \leq 1 \quad (6)$$

where I_j is the contact current component at frequency j , and $I_{L,j}$ is the reference level of the contact current at frequency j as given in Table 5.

NON SINUSOIDAL EXPOSURE

At low frequencies below 100 kHz the electric and particularly magnetic fields are in most cases distorted by harmonic components distributed over a large frequency band. Consequently, the waveforms of the fields show complex, often pulsed, patterns. It is always possible to decompose such a field to discrete spectral components by using, e.g., Fourier Transformation techniques (FT)

and applying the multiple frequency rule described above. This procedure is based on the assumption that the spectral components add in phase, i.e., all maxima coincide at the same time and results in a sharp peak. This is a realistic assumption when the number of spectral components is limited and their phases are not coherent, i.e., they vary randomly. For fixed coherent phases the assumption may be unnecessarily conservative. Additionally, sampling and windowing in FT spectral analysis may create spurious frequencies, which may artificially increase the linearly summed exposure ratio.

An alternative option to the spectral method is to weight the external electric and magnetic fields, induced electric field and induced current with a filter function which is related to the basic restriction or reference level (ICNIRP 2003b; Jokela 2000). In the case of a broadband field consisting of harmonic components the restriction imposed by the filtering can be presented mathematically as

$$\left| \sum_i \frac{A_i}{EL_i} \cos(2\pi f_i t + \theta_i + \varphi_i) \right| \leq 1, \quad (7)$$

where t is time and EL_i is the exposure limit at the i th harmonic frequency f_i , where A_i , θ_i , φ_i , are the amplitudes of the field, phase angles of the field and phase angles of the filter at the harmonic frequencies. Except the phase angles, the equation is similar to the summation eqns (3), (4), and (5). More guidance on the practical implementation of the weighting (determination of the weighted peak exposure) is given in the informative annex (Appendix).

PROTECTIVE MEASURES

ICNIRP notes that protection of people exposed to electric and magnetic fields could be ensured by compliance with all aspects of these guidelines.

Measures for the protection of workers include engineering and administrative controls, and personal protection programs. Appropriate protective measures must be implemented when exposure in the workplace results in the basic restrictions being exceeded. As a first step, engineering controls should be undertaken wherever possible to reduce device emissions of fields to acceptable levels. Such controls include good safety design and, where necessary, the use of interlocks or similar health protection mechanisms.

Administrative controls, such as limitations on access and the use of audible and visible warnings, should be used in conjunction with engineering controls. Personal protection measures, such as protective clothing, though useful in certain circumstances, should be regarded as a last resort to ensure the safety of the worker,

and priority should be given to engineering and administrative controls wherever possible. Furthermore, when such items as insulated gloves are used to protect individuals from shock, the basic restrictions must not be exceeded, since the insulation protects only against indirect effects of the fields.

With the exception of protective clothing and other personal protection, the same measures can be applied to the general public whenever there is a possibility that the general public reference levels might be exceeded. It is also essential to establish and implement rules that will prevent

- interference with medical electronic equipment and devices (including cardiac pacemakers);
- detonation of electro-explosive devices (detonators); and
- fires and explosions resulting from ignition of flammable materials by sparks caused by induced fields, contact currents, or spark discharges.

CONSIDERATIONS REGARDING POSSIBLE LONG-TERM EFFECTS

As noted above, epidemiological studies have consistently found that everyday chronic low-intensity (above 0.3–0.4 μT) power frequency magnetic field exposure is associated with an increased risk of childhood leukemia. IARC has classified such fields as possibly carcinogenic. However, a causal relationship between magnetic fields and childhood leukemia has not been established nor have any other long term effects been established. The absence of established causality means that this effect cannot be addressed in the basic restrictions. However, risk management advice, including considerations on precautionary measures, has been given by WHO (2007a and b) and other entities.

Acknowledgments—The support received by ICNIRP from the International Radiation Protection Association, the World Health Organization, the International Labour Office, the European Commission, and the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety is gratefully acknowledged. ICNIRP is also very thankful to the ICNIRP consulting experts and all other reviewers for their contribution received via the open online consultation.

During the preparation of these guidelines, the composition of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection and the ICNIRP ELF Task Group were as follows:

ICNIRP

P. Vecchia, Chairperson (Italy)
 M. Hietanen, Vice-Chairperson until 2008 (Finland)
 R. Matthes, Vice-Chairperson since 2008 (Germany)
 A. Ahlbom until 2008 (Sweden)
 E. Breitbart until 2008 (Germany)
 F. R. de Gruijl until 2008 (The Netherlands)
 M. Feychting (Sweden)
 A. Green (Australia)
 K. Jokela (Finland)

J. Lin (USA)
 R. Saunders (United Kingdom)
 K. Schulmeister (Austria)
 P. Söderberg (Sweden)
 B. Stuck (USA)
 A. Swerdlow (United Kingdom)
 M. Taki until 2008 (Japan)
 B. Veyret (France)
 G. Ziegelberger, Scientific Secretary (Austria)
 M. H. Repacholi, Chairman Emeritus (Switzerland)
 ICNIRP ELF Task Group
 R. Matthes (Germany), ELF Task Group Chairman
 A. Ahlbom (Sweden)
 K. Jokela (Finland)
 C. Roy (Australia)
 R. Saunders (United Kingdom)

REFERENCES

- Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer* 83:692–698; 2000.
- Attwell D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system. *Radiat Protect Dosim* 106:341–348; 2003.
- Bahr A, Bolz T, Hennes C. Numerical dosimetry ELF: Accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines. *Health Phys* 92:521–530; 2007.
- Barth A, Ponocny I, Ponocny-Seliger E, Vana N, Winker R. Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis. *Bioelectromagnetics* 31:173–179; 2010.
- Cech R, Leitgeb N, Pediaditis M. Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure. *Phys Med Biol* 53:177–186; 2008.
- Cook CM, Thomas AW, Prato FS. Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: a review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23:144–157; 2002.
- Cook CM, Saucier DM, Thomas AW, Prato FS. Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time-course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001–2005). *Bioelectromagnetics* 27:613–627; 2006.
- Crasson M. 50–60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review. *Radiat Protect Dosim* 106:333–340; 2003.
- Crumpton MJ, Collins AR. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? *DNA Repair (Amst)* 3:1385–1387; 2004.
- Dimbylow PJ. Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys Med Biol* 50:1047–1070; 2005.
- Dimbylow PJ. Development of pregnant female, hybrid voxel-mathematical models and their application to the dosimetry of applied magnetic and electric fields at 50 Hz. *Phys Med Biol* 51:2383–2394; 2006.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol* 37:329–340; 2008.

- Greenland S, Sheppard AR, Kaune WT, Poole C, Kelsh MA. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. *Epidemiol* 11:624–634; 2000.
- Hirata A, Wake K, Watanabe S, Taki M. In-situ electric field and current density in Japanese male and female models for uniform magnetic field exposures. *Radiat Protect Dosim* 135:272–275; 2009.
- Huss A, Spoerri A, Egger M, Rössli M. Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol* 169:167–175; 2009.
- International Agency for Research on Cancer. Static and extremely low frequency electric and magnetic fields. Lyon, France: IARC; IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Volume 80; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494–522; 1998.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. General approach to protection against non-ionizing radiation. *Health Phys* 82:540–548; 2002.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (0–100 kHz). In: Bernhardt JH, Matthes R, McKinlay A, Vecchia P, Veyret B, eds. Review of the scientific evidence and health consequences. Munich: ICNIRP; 2003a.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. *Health Phys* 84:383–387; 2003b.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Medical magnetic resonance (MR) procedures: protection of patients. *Health Phys* 87:197–216; 2004.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limiting exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 96:504–514; 2009.
- International Electrotechnical Commission. Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range—methods for calculating the current density and internal electric field induced in the human body. Geneva: IEC 62226; 2004.
- International Electrotechnical Commission. Measurement methods for electromagnetic fields of household appliances and similar apparatus with regard to human exposure. IEC 62233; 2005a.
- International Electrotechnical Commission. Medical electrical equipment—part 1: general requirements for safety; 2: collateral standard: electromagnetic compatibility—requirements and tests. Geneva: IEC 60601-1-2; 2005b.
- IEEE. IEEE 1308 Recommended Practice for Instrumentation: Specifications for Magnetic Flux Density and Electric Field Strength Meters - 10 Hz to 3 kHz. IEEE, Piscataway; 1994.
- IEEE. IEEE 644-1994 (Reaff 2008). IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines; IEEE, Piscataway; 2008.
- Jefferys JG. Experimental neurobiology of epilepsies. *Curr Opin neurol* 7:113–122; 1994.
- Jokela K. Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields. *Health Phys* 79:373–388; 2000.
- Jokela K. Assessment of complex emf exposure situations including inhomogeneous field distribution. *Health Phys* 92:531–540; 2007.
- Juutilainen J. Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Radiat Protect Dosim* 106:385–390; 2003.
- Juutilainen J. Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 7:107–115; 2005.
- Kanai R, Chaieb L, Antal A, Walsh V, Paulus W. Frequency-dependent electrical stimulation of the visual cortex. *Curr Biol* 18:1839–1843; 2008.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J, Savitz D. Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. *Scand J Work Environ Health* 33:5–12; 2007.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H, Feychting M, Harrington M, Kavet R, Marsh G, Mezei G, Renew DC, van Wijngaarden E. Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations. *Occup Environ Med* 66:72–80; 2009.
- McNamee DA, Legros AG, Krewski DR, Wisenberg G, Prato FS, Thomas AW. A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health* 82:919–933; 2009.
- Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, Kunieda E, Watanabe S, Taki M, Yamanaka Y. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry. *Phys Med Biol* 49:1–15; 2004.
- Nyenhuys JA, Bourland JD, Kildishev AV, Schaefer DJ. Health effects and safety of intense gradient fields. In: Shellock F, ed. *Magnetic resonance procedures: Health effects and safety*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2001: 31–54.
- Pogosyan A, Gaynor LD, Eusebio A, Brown P. Boosting cortical activity at beta-band frequencies slows movement in humans. *Curr Biol* 19:1–5; 2009.
- Reilly J. *Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology*. New York: Springer-Verlag; 1998.
- Reilly JP. Comments concerning “guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 76:314–315; 1999.
- Reilly JP. Neuroelectric mechanisms applied to low frequency electric and magnetic field exposure guidelines—part I: sinusoidal waveforms. *Health Phys* 83:341–355; 2002.
- Reilly J, Diamant A. Spatial relationships in electrostimulation: application to electromagnetic field standards. *IEEE Trans on Biomed Eng* 50:783–785; 2003.
- Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med* 67:224–232; 2005.
- Saunders RD, Jefferys JG. Weak electric field interactions in the central nervous system. *Health Phys* 83:366–375; 2002.
- Saunders RD, Jefferys JG. A neurobiological basis for ELF guidelines. *Health Phys* 92:596–603; 2007.
- So PPM, Stuchly MA, Nyenhuys JA. Peripheral nerve stimulation by gradient switching fields in magnetic resonance imaging. *IEEE Trans on Biomed Eng* 51:1907–1914; 2004.
- Stuchly MA, Dawson TW. Human body exposure to power lines: relation of induced quantities to external magnetic field. *Health Phys* 83:333–340; 2002.
- World Health Organization. *Environmental Health Criteria* 238. Extremely low frequency (ELF) fields. Geneva: World Health Organization; 2007a.
- World Health Organization. *Electromagnetic fields and public health: exposure to extremely low frequency fields. Fact Sheet No 322*. Geneva: World Health Organization; 2007b.

Xi W, Stuchly MA. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl Comput Electromagn Soc J* 9:127–134; 1994.

APPENDIX

Informative annex

Determination of the weighted peak exposure.

The weighting may be implemented by computing first the spectrum of the waveform and then applying eqn (7). In many applications, however, it is more convenient to use analog or digital filtering of the waveform in the time domain. The gain of the filter (ratio of the output to the input signal) should vary as a function of frequency in direct proportion to the exposure limit $G = EL(f_{ref})/EL(f)$, where EL is the limit at frequency f and f_{ref} is an arbitrary reference frequency from 1 Hz to 100 kHz. The peak value of the filtered waveform should not exceed the exposure limit (basic restriction or reference level) converted to the peak (amplitude) value at the reference frequency. Table 6 shows an example of the derived peak limits. In addition to the amplitude physical filters always influence on the phase of the field, which changes the peak value of the filtered field. As shown in Figs. 1, 2, and 3 the limits are divided to the frequency ranges where the limit varies directly proportional to $1/f^2$, $1/f$, f^0 (constant), or f . On the $1/f^2$, $1/f$, f^0 , and f ranges the phase angle of the filter φ_i (see eqn 7) is 180, 90, 0, and -90° , respectively. The weighting filter can be approximated with an electronic or digital filter where the attenuation should not deviate more than 3 dB and phase more than 90° from the exact piecewise linear frequency response. As an example, Fig. A1 shows the attenuation and phase as a function of frequency for the filter used for the weighting of the induced electric field. The approximate curves are based on a simple approximation with RC (resistor/capacitor) type filter function. The weighted peak approach can be used both for coherent and non-coherent fields. In the latter case the measurement time must be long enough to detect the worst case peak value with a reasonable probability. In the case of non-coherent fields, consisting of a few frequencies, the weighted peak approach is identical to the spectral summation.

Table 6. Derived peak limits for non-sinusoidal electric and magnetic fields. The reference frequency is 50 Hz.

	$E_{induced}$ (mV m ⁻¹) Brain	body tissue	$E_{external}$ (V m ⁻¹)	B μT
Occupational	$\sqrt{2} \times 100$	$\sqrt{2} \times 800$	$\sqrt{2} \times 10,000$	$\sqrt{2} \times 1,000$
General public	$\sqrt{2} \times 20$	$\sqrt{2} \times 400$	$\sqrt{2} \times 5,000$	$\sqrt{2} \times 200$

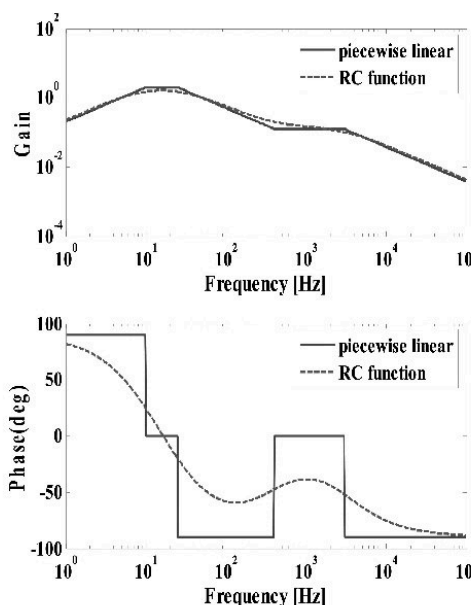


Fig. A1. Amplitude and phase response for the weighting of the induced electric field.

GLOSSARY

Adverse effect

An effect detrimental to the health of an individual due to exposure to an electric or magnetic field, or a contact current.

Averaging distance

The distance over which the *internal* electric field is averaged when determining compliance with basic restrictions.

Basic restrictions

Mandatory limitations on the quantities that closely match all known biophysical interaction mechanisms with tissue that may lead to adverse health effects.

Cancer

Diseases characterized by the uncontrolled and abnormal division of eukaryotic cells and by the spread of the disease (metastasis) to disparate sites in the organism.

Central nervous system (CNS)

The portion of the vertebrate nervous system consisting of the brain and spinal cord, but not including the peripheral nerves.

Characteristics

Detailed physical properties of electric or magnetic fields such as the magnitude, frequency spectrum, polarization, modulation, etc.

Conductivity

A property of materials that determines the magnitude of the electric current density when an electric field is impressed on the material, expressed in units of siemens per meter ($S\ m^{-1}$); the inverse of resistivity.

Contact current

Current passed into a biological medium via a contacting electrode or other source of current.

Current density

A vector of which the integral over a given surface is equal to the current flowing through the surface; the mean density in a linear conductor is equal to the current divided by the cross-sectional area of the conductor. Expressed in ampere per square meter ($A\ m^{-2}$).

DC

Abbreviation for “direct current,” but also used for to indicate constancy of fields, see “Static field.”

Depolarization (cellular)

The reduction of the resting potential across a cellular membrane.

Direct effect

A biological effect resulting from direct interaction of EMF with biological structures.

Direct electro stimulation

Stimulation via the electric field within the biological medium induced by an external electric or magnetic field without direct contact with other conductors or spark discharges.

DNA (deoxyribonucleic acid)

A polymeric molecule consisting of deoxyribonucleotide building blocks that in a double-stranded, double-helical form is the genetic material of most organisms.

Dosimetry

Measurement, or determination by calculation, of internal electric field strength or induced current density or specific absorption (SA), or specific absorption rate (SAR), in humans or animals exposed to electromagnetic fields.

Electric field

A vector field E measured in volts per meter.

Electric field strength (E)

Force exerted by an electric field on an electric point charge, divided by the electric charge. Electric field strength is expressed in newton per coulomb or volts per meter ($N/C = V/m$).

Electromagnetic energy

The energy stored in an electromagnetic field. Expressed in joule (J).

Electromagnetic fields

The combination of electric and magnetic fields in the environment. This term is often confused with “electromagnetic radiation” and can therefore be misleading when used with extremely low frequencies for which the radiation is barely detectable.

Electro stimulation

Induction of a propagating action potential in excitable tissue by an applied electrical stimulus; electrical polarization of presynaptic processes leading to a change in post synaptic cell activity.

EMF

Electric and magnetic fields.

Established mechanism

A bioelectric mechanism having the following characteristics: (a) can be used to predict a biological effect in humans; (b) an explicit model can be made using equations or parametric relationships; (c) has been verified in humans, or animal data can be confidently extrapolated to humans; (d) is supported by strong evidence; and (e) is widely accepted among experts in the scientific community.

Exposure

That which occurs whenever a person is subject to the influence of a low frequency field or contact current.

Exposure, long-term

This term indicates exposure during a major part of the lifetime of the biological system involved; it may, therefore, vary from a few weeks to many years in duration.

Exposure assessment

The evaluation of a person’s exposure by measurements, modeling, information about sources or other means.

Exposure metric

A single number that summarizes exposure to an electric and/or magnetic field. The metric is usually determined by a combination of the instrument’s signal

processing and the data analysis performed after the measurement.

Frequency

The number of sinusoidal cycles completed by electromagnetic waves in 1 second; usually expressed in hertz (Hz).

General public

The term General public refers to the entire population. It includes individuals of all ages, and of varying health status, and this will include particularly vulnerable groups or individuals such as the frail, elderly, pregnant workers, babies and young children.

General public exposure

All exposure to low frequency fields received by members of the general public. This definition excludes occupational exposure, and medical exposure.

Harmonic (frequency)

Frequencies that are integral multiples of the power frequency or some other reference frequency.

Heart rate

The measurement of the number of heartbeats per minute.

Hertz (Hz)

The unit for expressing frequency, (*f*). One hertz equals one cycle per second. 1 kHz = 1,000 Hz, 1 MHz = 1,000 kHz, 1 GHz = 1,000 MHz.

Induction

An electric or magnetic field in a conducting medium caused by the action of a time-varying external (environmental) electric or magnetic field.

Instantaneous

Adjective used to describe particular parameters that must be measured or evaluated over a very short time interval (typically 100 microseconds or less).

Let-go current

The threshold current level at which involuntary muscular contraction prevents release of a grip on an energized conductor.

Magnetic field

A vector quantity, *H*, specifies a magnetic field at any point in space, and is expressed in ampere per meter ($A\ m^{-1}$). See also magnetic flux density.

Magnetic field strength (*H*)

The magnitude of the magnetic field vector; expressed in units of ampere per meter (A/m).

Magnetic flux density (*B*)

A vector quantity that determines the force on a moving charge or charges (electric current). Magnetic flux density is expressed in tesla (T). One gauss (deprecated unit) equals 10^{-4} T.

Magnetophosphenes

The sensation of flashes of light caused by induced electric currents stimulating the retina.

Mean

The arithmetic average of a series of measurements or other data.

Median threshold

The threshold value within a statistical distribution at which 50% of subjects have greater thresholds and 50% have lesser thresholds.

Medical exposure

Exposure of a person to low frequency fields received as a patient undergoing medical diagnosis or recognized medical treatment, or as a volunteer in medical research.

Mutagen

A substance that is able to cause a mutation.

Mutation

Any detectable and heritable change in the genetic material not caused by genetic recombination.

Nerve

A bundle of axons.

Nerve fiber

A single nerve axon.

Neuron

A single cellular unit usually consisting of an axon, cell body, and dendritic tree.

Non-ionizing radiation (NIR)

Includes all radiations and fields of the electromagnetic spectrum that do not normally have sufficient energy to produce ionization in matter; characterized by energy per photon less than about 12 eV, which is equivalent to wavelengths greater than 100 nm, or frequencies lower than 3×10^{15} Hz.

No uniform field

A field that is not constant in amplitude, direction, and relative phase over the dimensions of the body or body part under consideration. In the case of electric fields, the definition applies to an environmental field undisturbed by the presence of the body.

Occupational exposure

All exposure to EMF experienced by individuals as a result of performing their regular or assigned job activities.

Peripheral nerve

Nerve found outside the central nervous system and leading to and from the central nervous system.

Permeability

The scalar or tensor quantity whose product by the magnetic field strength is the magnetic flux density. Note: For isotropic media, the permeability is a scalar; for anisotropic media, a matrix. Synonym: absolute permeability. If the permeability of a material or medium is divided by the permeability of vacuum (magnetic constant) μ_0 , the result is termed relative permeability (μ). Unit: henrys per meter (H m^{-1}).

Permittivity

A constant defining the influence of an isotropic medium on the forces of attraction or repulsion between electrified bodies, and expressed in farad per meter (F/m); *relative permittivity* is the permittivity of a material or medium divided by the permittivity of vacuum.

Phase duration (t_p)

The time between zero crossings of a waveform having zero mean. For a sine wave of frequency f , $t_p = 1/(2f)$. For an exponential waveform, t_p is interpreted as the duration measured from the waveform peak to a point at which it decays to 0.37 (e^{-1}) of its peak value.

Phosphene

Visual sensation caused by non-photoc stimuli. Electro-phosphenes are induced by electric currents; magneto-phosphenes are induced magnetically.

Plasma membrane

Lipid bilayer that surrounds the cytoplasm of both animal and plant cells.

Polarization (cellular)

The electric potential formed across a cell membrane.

Power frequency

The frequency at which AC electricity is generated. For electric utilities, the power frequency is 60 Hz in

North America, Brazil, and parts of Japan, and 50 Hz in much of the rest of the world.

Protein

One of a group of high-molecular weight, nitrogen-containing organic compounds of complex shape and composition.

Public exposure

All exposure to EMF experienced by members of the general public, excluding occupational exposure and exposure during medical procedures.

Radiofrequency (RF)

Electromagnetic energy with frequencies in the range 3 kHz to 300 GHz.

Reduction factor

Reduction of the effect threshold to compensate for various sources of uncertainty in the guideline setting process. Some examples of sources of uncertainty about exposure-effect threshold levels include the extrapolation of animal data to effects on humans, differences in the physiological reserves of different people with corresponding differences in tolerance, and statistical uncertainties (confidence limits) in the dose-response function. In ICNIRP's view, uncertainty in measurements used to implement the guidelines is a problem more appropriate to the functions of organizations responsible for the development of compliance methods. It is not considered in the setting of reduction factors by ICNIRP.

Reference levels

The rms and peak electric and magnetic fields and contact currents to which a person may be exposed without an adverse effect and with acceptable safety factors. The reference levels for electric and magnetic field exposure in this document may be exceeded if it can be demonstrated that the basic restrictions are not exceeded.

Thus, it is a practical or "surrogate" parameters that may be used for determining compliance with the Basic Restrictions.

Relative permeability

(Absolute) permeability (q.v.) divided by the permeability in vacuum. A value near one signifies that the material is only weakly magnetized by an external field.

Relative phase

The phase angle of a sinusoidal waveform relative to the phase angle of another waveform measured at a different point within the conductive medium or with respect to a stated reference waveform.

Relative risk (RR)

The ratio of the disease rate in the group under study to that in a comparison group, with adjustments for confounding factors such as age, if necessary. For rare diseases, the relative risk is practically the same as the odds ratio.

Root mean square (rms)

The square root of the mean of the square of a time variant function, $F(t)$, over a specified time period from t_1 to t_2 . It is derived by first squaring the function and then determining the mean value of the squares obtained, and taking the square root of that mean value, i.e.,

$$F_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [F(t)]^2 dt}. \quad (\text{A1})$$

S.I.

Abbreviation for the International system of units.

Spatial peak

Term used to describe the highest level of a particular quantity averaged over a small mass or area in the human body.

Spark discharge

The transfer of current through an air gap requiring a voltage high enough to ionize the air, as opposed to direct contact with a source.

Static field

A field that does not vary with time. In most environments, electric and magnetic fields change with time, but their frequency spectrum has a component at 0 Hz. This “quasi-static” component of the field can be measured by averaging the oscillating signal over the sample time.

Tesla (T)

S.I. unit of magnetic flux density. 1 tesla = 10,000 gauss (q.v.).

Threshold

The level of a stimulus marking the boundary between a response and a no response.

Ventricular fibrillation

Arrhythmia of the ventricles of the heart characterized by rapid uncoordinated contractions.

Voxel

A three-dimensional computational element. In this standard used to represent animal and human tissues in dosimetry models.

Waveform

The variation of an electrical amplitude with time. Unless otherwise stated, in this standard the term *waveform* refers to values (or measurements) at sites within the biological medium.

Workers

See glossary term *Occupational exposure*.



Apéndice B: Hoja de especificaciones técnicas EFA-300

www.narda-sts.com

Field Analyzers

EFA-300



For Isotropic Measurement of Magnetic and Electric Fields

- ▲ Evaluation of Field Exposure compared to Major Standards and Guidance (selectable)
- ▲ Shaped Time Domain (STD) – an innovative technique for signal-shape-independent field measurements
- ▲ Fast Fourier Transform (FFT) Spectral Analysis
- ▲ Peak Value Measurement with Proper Phase
- ▲ Large-Capacity Data Storage
- ▲ Remote Control
- ▲ Frequency Range 5 Hz to 32 kHz



APPLICATIONS

The EFA-300 is the ideal field analyzer for measuring magnetic and electric fields in the workplace and in public spaces. The unit is designed for professional users in the power industry, at municipal utilities, by insurers, and for health and safety professionals in industry. In the low frequency range, they handle any measurement, simply and precisely.

This instrument provides field analysis using an FFT computation in addition to measuring magnetic and electric fields. The innovative STD mode opens up further application areas. With this new mode the measurement results for magnetic and electric field strength are displayed as a "Percent of Standard," regardless of the signal shape. This mode enables fast and reliable measurement and evaluation of the typical fields where complex, non-sinusoidal signals are common, e.g., in industrial applications that use resistance welding. Resistance welding issues surface in the traditional 50/60 Hz systems as well as in the newer medium-frequency switching units.



BASIC OPERATION

The EFA-300 has built-in, isotropic, magnetic field probes. Optional external probes can be used to handle other applications. For example, an isotropic B-field probe with high sensitivity and a large (100 cm²) cross-sectional area is available for the standardized measurement of dissimilar magnetic fields.

For measurements in hard-to-reach places, a miniature 3 cm diameter B-field "sniffer" probe is available.

Model EFA-300 includes a cubic-shaped, isotropic, E-field module. This E-field module contains both the sensor and circuitry that allows it to be operated independent of the base unit. The base instrument, or a computer with the EFA-TS remote software, can be used to read results in real-time and control the functions of the module. In the data-logging mode, the E-field module can be operated independently. Stored data can be read and analyzed at a later date using a computer and the EFA-TS software. The major advantage of operating the E-field module remotely is that it greatly reduces the influence of the human body on the electric field you are trying to measure.

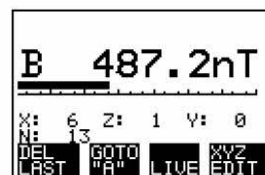


OPERATING MODES

Various standards and guidance take into account the fact that signal shape plays a major role in determining the workplace limit. For example, in Germany the employer's liability insurance association guideline on "Electromagnetic Fields" specifies different evaluation guidelines for different field shapes. Stationary sinusoidal and pulsed fields are differentiated. Occasionally both the RMS value and the peak value, (with proper phase) are critical for assessing exposure in the low-frequency range.

The aim of this new generation of equipment is to greatly simplify the measurement process. Besides measuring the RMS and peak values with the classic filter technique, the EFA-300 includes the highly innovative mode known as STD (Shaped Time Domain). With this new mode, both instruments achieve a new standard in simple but reliable measurement even in very complex environments. A standard's variation with frequency can be automatically taken into account and normalized. Field strength results are provided in a Percent of Standard". The user no longer needs any knowledge about the signal shape, frequency, or frequency-dependent limits.

For individual frequency and field strength analysis, a very fast FFT (Fast Fourier Transform) mode, which includes evaluation of harmonics, is available as an option.



FIELD STRENGTH MODE

Selective and Broadband Field Strength Measurements

In many practical applications, such as proximity to high-voltage lines and transformer stations, this measurement is simple and produces accurate results. If the field under test has essentially a single frequency component, the broadband mode is the best choice. A broadband measurement of the magnetic field in the frequency range from 5 Hz to 32 kHz is made using the built-in isotropic probe. The Model EFA-300 can also be used to measure the electric field with the external, cube-shaped E-field module.

For more precise analysis or multi-frequency fields, band pass and band reject filters are available in the frequency range of 15 Hz to 2 kHz with user-editable filter lists. Operation is configured to allow fast switching between common settings, e.g., broadband and band pass filter.



In broadband mode, the large, backlit display provides measurement and frequency results simultaneously.

Two plug-in B-field probes extend the range of possibilities. The small "sniffer" probe has a 3 cm diameter while the larger, more sensitive probe, has a 100 cm² cross-sectional area.

Users can choose between RMS and peak value measurement from less than 1 nT to 31.6 mT. The EFA-300 can also measure the E-field from less than 1 V/m to 100 kV/m.



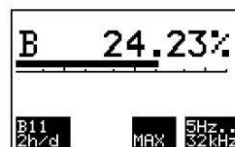
STD (Shaped Time Domain) EVALUATION MODE

Innovative Technique for Signal-Shape-Independent Field Measurements

In many situations, detailed knowledge of the field, test equipment and other auxiliary conditions are necessary to obtain insight into the degree of exposure when using traditional measurement equipment. Standardized evaluation entails complicated analysis. However, the new and innovative "Shaped Time Domain" technique simplifies the process.

The frequency dependency of standards is automatically incorporated when using shaped frequency response measurements. Suitable detectors are provided for measuring the RMS and peak values. The analysis takes into account the phase of the individual components.

The B or E field is measured over the entire frequency range up to 32 kHz in real time and displayed as a percent of standard.



STD analysis is not limited to specific signal shapes. Signals with one or more frequencies and pulsed signals are no problem. Pulsed signal measurements are possible since the time-domain limits (e.g., those specified for selected pulsed signals) can be directly converted into frequency-domain limits. Proper evaluation in a personal safety context is achieved quickly and reliably using the STD technique.

To evaluate the field, six limit curves (standards) are stored in the device. A simple download procedure can be used to update the instrument to cover new standards.

SPECTRUM FFT MODE (Optional)

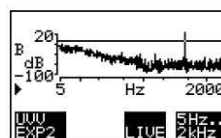
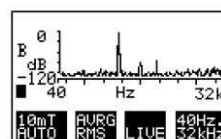
Spectrum analysis considerably simplifies the process of quickly evaluating multi-frequency signals up to 32 kHz. All spectral components are evaluated at once.

To provide a spectrum, the signal curve versus time is recorded via the probe and converted into the frequency domain using a mathematical procedure known as "Fast Fourier Transform".

The EFA-300 is so powerful that even transient events ranging up to 2 kHz can be analyzed in real time.

Evaluation is supported by graphics to clearly show the frequency spectrum and by cursor functions with frequency and level indications. The RMS and peak values of the nine most significant frequency components are easy to read.

You can also use this mode to normalize the display to a given standard. The measured value is then displayed relative to its associated standard. In visual terms, the frequency-dependent standard becomes a straight line. This makes it easy to determine the relevancy of each spectral component.



HARMONIC ANALYSIS MODE (Included with Spectrum FFT Mode)

This mode enables fast, convenient evaluation of the harmonic spectrum. A table lists the field strengths of the measured fundamental frequency along with up to 8 harmonics.

This feature is very useful for a "hands-off" verification of power quality ("Quality of Service") in addition to occupational safety applications.

F1:401.3Hz	
B1:20.76uT	
K2:0.0012%	K8:0.0023%
K3:0.0026%	K9:0.0012%
K4:0.0014%	K7:0.0023%
K5:0.0007%	KN:0.0712%
K6:0.0023%	
K7:0.0012%	

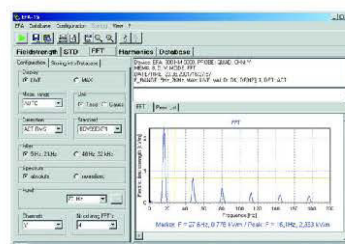
REMOTE AND DATA ANALYSIS SOFTWARE EFA-TS

This optional software is used to:

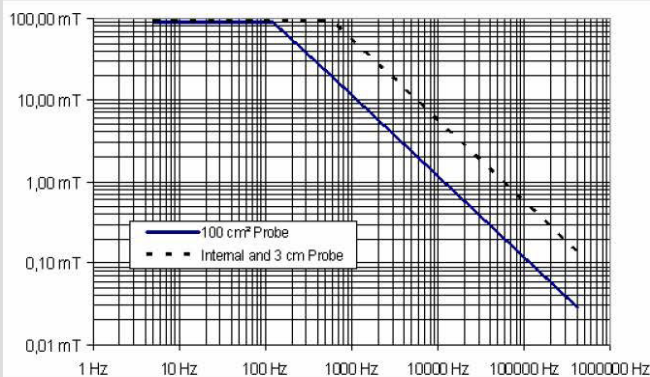
- Provide remote control of the field analyzer and data readout
- Download the data stored in the device
- Save acquired data on the computer
- Analyze the data and provide a graphic representation of the results to support the user in the preparation of measurement reports

Features

- Windows interface to configure the instrument and/or to control it remotely.
- Graphic representation of data stored in the internal memory of the instrument or in a file:
 - Line diagrams show field strength or Percent of Standard versus time. Can be used in real time.
 - Display of spectrum
 - Bar graph of harmonics
 - 2D-views with import possibility: background maps for Matrix-data sets
 - Graphic tools - zoom, marker, set-up for scale, color/thickness of lines, etc.
- Additional Analysis Functions:
 - Statistics - mean and maximum values, histogram, and number of values over a defined threshold
 - Peak list for spectrums
- Export Functions
 - Data sets as ASCII-files
 - Graphic screen into the clipboard



SPECIFICATIONS EFA-300

		Magnetic (B-) Field			Electric (E-) Field
		100 cm² Probe	Internal Probe	3 cm Probe	
Sensor System		Coil (internal or external)			Plate Electrode
Measurement Axis, selectable		Tri-Axial (Isotropic) or Single Axis			
FIELD STRENGTH MODE					
Frequency Range	Broadband (+0/-3 dB), selectable	5 Hz to 2 kHz, 30 Hz to 2 kHz, 5 Hz to 32 kHz or 30 Hz to 32 kHz			
	Band Pass / Band Reject Filter, adjustable	15 Hz to 2 kHz (resolution 0.1 Hz)			
Detection, selectable		RMS (averaging time 1 sec.)			
		Peak Value (proper phase)			
Measurement Range	Nominal	100 nT to 32 mT	100 nT to 32 mT	100 nT to 32 mT	10 V/m to 100 kV/m
	Damage Level (Peak)	91 mT ^a @≤125 Hz	91 mT ^a @≤625 Hz	91 mT ^a @≤625 Hz	280 kV/m
Damage Level (Peak)	Damage Level (Peak) ^a For magnetic field probes depending on frequency				
Noise level (RSM), typical	Broadband, 30 Hz to 2 kHz	4 nT	100 nT	20 nT	0.7 V/m
	Broadband, 5 Hz to 32 kHz	10 nT	200 nT	50 nT	4.5 V/m
	Band Pass Filter, 50 Hz to 400 Hz	0.8 nT	25 nT	5 nT	0.14 V/m
Uncertainty, typical ^b	Broadband, 5 Hz to 2 kHz	±3% @ ≥40 nT	±5% @ ≥1μT	±4% @ ≥200 nT	±3% @ ≥5 V/m
	Broadband, 5 Hz to 32 kHz	±3% @ ≥80 nT	±8% @ ≥2 μT	±5% @ ≥400 nT	±3% @ ≥40 V/m
	Band Pass Filter, 50 Hz to 400 Hz	±3% @ ≥10 nT	±5% @ ≥250 nT	±4% @ ≥50 nT	±3% @ ≥1 V/m

^a The upper limit decreases linearly with increasing frequency above the mentioned frequency.

Overload limit for 100 cm² Probe = $\left(\frac{8000 \text{ mT} \cdot \text{Hz}}{\text{Frequency}} \right) \sqrt{2}$

Overload limit for 3 cm and internal Probe 100 cm² Probe = $\left(\frac{40000 \text{ mT} \cdot \text{Hz}}{\text{Frequency}} \right) \sqrt{2}$

^b Uncertainty includes all partial uncertainties (absolute, linearity, frequency response, and isotropy) as well as temperature and humidity related deviations. Signal sinusoidal, level >10% of selected measurement range, additional uncertainties apply with the steep frequency band limits.

		Magnetic (B-) Field			Electric (E-) Field
		100 cm² Probe	Internal Probe	3 cm Probe	
EXPOSURE STD MODE					
Frequency Range (+0/-3 dB)		5Hz to 32 kHz			
Exposure Evaluation		Compared to Standards Stored in Meter *			
Measurement Range / Overload Limit		200%	200%	200%	200%
Noise Level, typical ^a (for ICNIRP Occupational)		<0.4%	<2%	<1%	<5%
Uncertainty, typical (percent of reading) ^b		±4%	±9%	±6%	±4%
SPECTRUM FFT / HARMONICS MODE (Optional)					
Frequency Range		5 Hz to 2kHz 40 Hz to 32 kHz			
Fundamental Range (HARMONICS only)		10 Hz to 400 Hz 10 Hz to 10 kHz (Option, FFT 5Hz-32kHz)			
Resolution by	2 kHz Range	0.01 Hz			
Marker:	32 kHz Range	0.1 Hz			
Frequency	2 kHz Range	Full-Scale Logarithmic or 100 Hz Wide Linear Span			
Scale, selectable:	32 kHz Range	Full-Scale Logarithmic or 1000 Hz Wide Linear Span			
Detection, selectable		RMS, RMS Average, Peak Value or Vector Peak Value (at each single frequency, proper phase)			
Measurement Range		See FIELD STRENGTH MODE			
Noise/ Spurious Level (RSM), typical		See Table 1 (on next page)			
Uncertainty, by marker ^b		See FIELD STRENGTH MODE			
Results Scale, selectable		20 dB to 120 dB (logarithmic)			
Data Acquisition, (start/stop)	2 kHz Range	Continuous and Overlapping / Seamless			
	32 kHz Range	Continuous			
Window Length:	2 kHz Range	1.0 second			
	32 kHz Range	0.1 second			
Result Averaging, selectable	2 kHz Range	1, 2, 4, or 8 seconds			
	32 kHz Range	4, 8, 16, or 32 Spectra			
Graphical Display, selectable (SPECTRUM FFT only)		Result: Absolute or Normalized to Reference Limit of Selected Standard; Marker Displays 9 Highest Peaks within Selected Frequency Range			
Result List, tabular (HARMONICS only)		Result of 2 nd to 9 th Harmonic * and Total Distortion (with/within noise), Referenced to the Level of Fundamental Frequency			
MEASUREMENT DATA MEMORY (individual in B- and E-Field unit)					
Capacity, typical (dependent on setting)		3600 Single Values or 22 Spectral Analyses			
Control:	Field Strength & Exposure STD Modes	Manual or Sequence Timer or Sequence Spatial-Assigned			
	Spectrum FFT & Harmonics Modes	Manual Only			

^b Uncertainty includes all partial uncertainties (absolute, linearity, frequency response, and isotropy) as well as temperature and humidity related deviations. Signal sinusoidal, level >10% of selected measurement range; additional uncertainties apply with the steep frequency band limits.

^c Stored standards can be updated by software: e.g. ICNIRP: occupational, general public, BGV B11: Exp. (2 h/d), Exp. 1, Exp. 2; VDE 0848: draft

^d Dependent on selected standard.

^e Limited by selected frequency range.

GENERAL SPECIFICATIONS		
Display	LCD Dot Matrix 128x64 Pixel with Backlight	Via B-Field Unit
Alarm, Adjustable Threshold	Acoustical, Optical	Via B-Field Unit
Current Documentation (Specific Modes Only)	Input of Prevailing and Reference Current Value; Storage with Measurement Value of Field	N/A
Interface (Remote Control, Data Memory)	Optical, Serial (RS-232)	
Operating Temperature Range	0°C to +50°C	
Humidity	<95 % or <29 g/m ³ Occasional Brief Condensation Tolerable	
Operating Interval, typical	Continuous Measurement	10 Hours
	Programmed Sequence Time	24 Hours
Calibration Interval, recommended	24 Months	
Battery	NiMH Batteries (5x C-cell), exchangeable	NiMH Batteries, built in
Dimensions, approximate	110 x 200 x 60 mm	105 x 105 x 105 mm
Weight, approximate	1000 g	1000 g
Country of origin	Germany	

TABLE 1: SPECTRUM FFT SENSITIVITY (Noise / Spurious)

	Magnetic (B-) Field			Electric (E-) Field
	100 cm ² Probe	Internal Probe	3 cm Probe	
2 kHz Range	<45 nT @ ≤48 Hz	<400 nT @ ≤48 Hz	<260 nT @ ≤48 Hz	<0.3 V/m @ ≤48 Hz
	<4 nT @ >48 Hz	42 nT @ >48 Hz	<23 nT @ >48 Hz	<0.1 V/m @ >48 Hz
	< 0.05 nT @ noise floor	<2 nT @ noise floor	< 0.2 nT @ noise floor	<0.02 V/m @ noise floor
32 kHz Range	<2 nT @ <200 Hz	<22 nT @ <200 Hz	<10 nT @ <200 Hz	
	<0.3 nT @ 200 Hz to 20 kHz	<11 nT @ 200 Hz to 20 kHz	<2 nT @ 200 Hz to 20 kHz	<0.1 V/m @ ≤20 kHz
	<0.6 nT @ >20 kHz	<11 nT @ >20 kHz	<3 nT @ >20 kHz	<3 V/m @ >20 kHz
	<0.07 nT @ noise floor	<1.5 nT @ noise floor	<0.3 nT @ noise floor	<0.05 V/m @ noise floor

ORDERING INFORMATION

EFA-300 Electric and Magnetic Field Analyzer	Part number
<ul style="list-style-type: none"> - Basic Unit (EFA-300, EM Field Analyzer System, 5 Hz-32kHz), Calibrated - Mode: FIELD STRENGTH, EXPOSURE STD, HARMONIC ANALYSIS - Hard case for EFA-300 - O/E Converter ORSD-9 Universal - Cable, Fiber Optic Duplex (1000µm), 2m - Software, EFA-200/-300 Tools - Power Supply 9VDC, 100V-240VAC, all Plugs - Operating Manual EFA-200/-300, English or German 	2245/301 <i>Please specify Manual: English or German</i>
Probe, Electric Field for EFA-300	
<ul style="list-style-type: none"> - E-Field-Probe 5 Hz-32 kHz for EFA-300, Calibrated - Power Supply 9VDC, 100V-240VAC, all Plugs - Cable, Fiber Optic Duplex (1000µm), 10m - Tripod, Non-Conductive, 1.65m with Carrying Bag 	2245/302
SET	
EFA-300, EM Field Analyzer Set (2245/301 with Electrical Field Probe 2245/302)	2245/30
EFA-300, EM Field Analyzer Set (with Electrical Field Probe) and Option FFT 32 kHz	2245/30/FFT-32
EFA 300 with Option FFT 32 kHz	2245/301/FFT32
Probe, Electric Field for EFA-300 with Option FFT 32 kHz	2245/302/FFT32
OPTIONS	
Option, FFT 5Hz-32kHz - Please provide S/N of EFA-200 or EFA-300 and Probe	2245/95.15
Option, FFT 2kHz-32kHz - Please provide S/N of EFA-200 or EFA-300 and Probe, only with Option, FFT 5Hz-2kHz	2245/95.19
OPTIONAL PROBES	
Probe, B-Field, A=100cm²	2245/90.10
Probe, B-Field, D=30mm	2245/90.20
PC SOFTWARE	
Software, EFA-TS, Remote and Data Analysis Software	2245/93.56
ACCESSORIES	
Cable, Probe Extension 1.25m	2244/90.35
Tripod, Non-Conductive, 1.65m with Carrying Bag	2244/90.31
Tripod Extension, 0.50m, Non-Conductive	2244/90.45
Cable, Adapter USB 2.0 - RS232, 0.8m	2260/90.53

Narda Safety Test Solutions GmbH
 Sandwiesenstrasse 7
 72793 Pfullingen, Germany
 Phone: +49 (0) 7121-97 32-777
 Fax: +49 (0) 7121-97 32-790
 E-Mail: support@narda-sts.de
 www.narda-sts.de

Narda Safety Test Solutions
 435 Moreland Road
 Hauppauge, NY 11788, USA
 Phone: +1 631 231-1700
 Fax: +1 631 231-1711
 E-Mail: NardaSTS@L-3COM.com
 www.narda-sts.com

Narda Safety Test Solutions Srl
 Via Leonardo da Vinci, 21/23
 20090 Segrate (Milano) - ITALY
 Tel.: +39 02 26952421
 Fax: +39 02 26952406
 Email: support@narda-sts.it
 www.narda-sts.it

Apéndice C: Hoja de especificaciones técnicas NBM-550

www.narda-sts.com

NARDA BROADBAND FIELD METER

NBM-550



Measuring electric and magnetic fields

ranging from low frequency to microwaves

- ▲ Non-directional measurement using isotropic probes for applications in the frequency range 1 Hz to 90 GHz
- ▲ Large, graphic display for easy-to-read results
- ▲ Intelligent probe interface with automatic detection of probe parameters for simple operation
- ▲ Memory for up to 5000 measurement results
- ▲ Automatic storage of position data with GPS interface and plug-in GPS receiver (accessory)
- ▲ Voice recording for comments



OPTIONAL

- ▲ Probe for spectral measurements and Weighted Peak from 1 Hz to 400 kHz



Narda Broadband Field Meter NBM-550

DESCRIPTION

The Narda Broadband Field Meter NBM-550 is part of the NBM-500 device family. It makes extremely accurate measurements of non-ionizing radiation. Equipped with probes for measuring electric and magnetic field strengths, it covers all frequencies from just a few Hz as found in industrial applications through to long wave and on up to microwave radiation. Flat frequency response probes ("flat probes"), as well as so-called shaped probes that evaluate the field strength on the basis of a human safety standard are available. A probe with built-in FFT analysis enables spectral measurements in the low frequency range. These probes are calibrated separately from the field meter, and include a non-volatile memory that contains the probe parameters and calibration data. They can therefore be used with any device in the NBM-500 family without losing any of the calibration accuracy.

APPLICATIONS

The NBM-550 is used to make precision measurements to establish human safety, particularly in workplace environments where high electric or magnetic field strengths are likely to occur. Some examples are:

- Measuring field strengths to comply with general safety regulations, such as the EMF Directive 2013/35/EU
- Establishing safe zones
- Measuring and monitoring field strengths around broadcasting and radar equipment
- Measuring field strengths of cell phone transmitters and satellite communications systems to demonstrate compliance with human safety standard limit values
- Measuring field strengths in the industrial environment, such as plastics welding equipment, RF heating, tempering, and drying equipment
- Measurements for protecting users of diathermy equipment and other medical devices that generate high-frequency radiation
- Measuring field strength in TEM cells and absorber chambers to demonstrate electromagnetic compatibility (EMC)
- Spectral measurements on LF fields emanating from industrial equipment or overhead power cables



*Robust yet light and easy to carry,
designed for simple, one-hand operation*



*Changing the probe is quick and easy, with
no need to reconfigure the device*

FEATURES with high frequency probes

The Narda Broadband Meter NBM-550 is designed for on-site use. The combined features listed below ensure that it delivers precise results quickly and simply, even under difficult operating conditions.

Display and operation

- Graphical user interface with selectable language.
- Backlit monochrome LCD with selectable illumination time; easy to read, even in bright daylight.

Result display and evaluation

- 5 types of result can be displayed in easy-to-read form: Momentary RMS value (Actual), minimum RMS value (Min), maximum RMS value (Max Hold), average RMS value (Average), maximum average RMS value (Max Avg).
- History Mode memory operates continuously in the background. This allows you to graphically evaluate and save the results for the previous 8 hours of operation (see upper picture opposite).
- Selectable units: V/m, A/m, mW/cm², W/m² when using non-weighted (flat) probes, % of limit value when using weighted (shaped) probes.
- Stored limit values for common human safety standards allow direct display of results for flat probes in % of limit value at a known frequency of the field under test (see lower picture opposite).

Automatic adjustment, application of calibration data

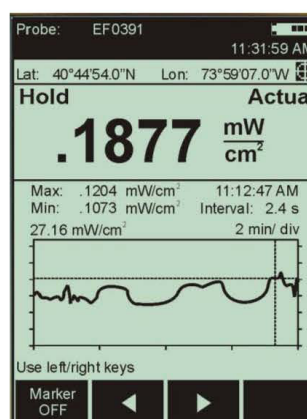
- Intelligent probe interface detects the NBM probe type and automatically recalls and applies the correction values that were recorded during calibration.
- Fully automatic zero point adjustment at programmable time intervals.
- Reminder function lets you know when calibration is due.

Special evaluations

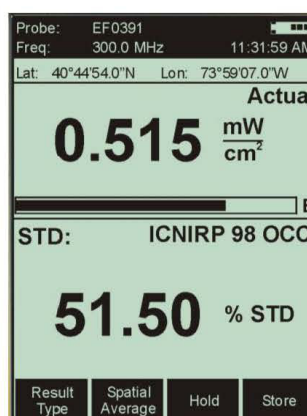
- Time averaging, period settings of up to 30 minutes.
- Spatial averaging, discrete or continuous.
- Multi-position spatial averaging for up to 24 locations.

Warning functions

- Audible warning with programmable alarm threshold.
- Hot spot search function with audible warning.



History Mode shows the variation of field strength versus time as a graph. Numerical values can be read out using the marker.



Apply Standard: You can also display the field strength as a percentage of the limit value of a standard even when using flat probes. Simply select the standard on the NBM-550 (ICNIRP in the example shown) and set the frequency. The evaluation is useful if the main component of the field strength is due to a single source of known frequency. Available standards are listed on page 6.

FEATURES with EHP-50F

The EHP-50F FFT analyzer can be conveniently and easily controlled by the Narda Broadband Meter NBM-550 for spectral measurements on low frequency fields. The measured values for the electric or magnetic field are shown on the display of the NBM-550.

Communication between the EHP-50F and the NBM-550 is via an optical cable to avoid affecting the measured field strength. The NBM-550 automatically detects a connected EHP-50F after it is switched on.

Result display and evaluation

- Display modes:
 - Weighted Peak** (WPM) according IEC 61786-2, provides signal weighting in time domain for a selected standard and covers the frequency range from 1 Hz to 400 kHz. Display is in %.
 - Spectrum** mode displays frequency-selective measured RMS values
 - Standard** mode displays the measured RMS values in % referred to the permitted limit value of a selected safety standard
 - XYZ** simultaneously displays the RMS values measured synchronously for the three spatial axes
 - Monitor** for parallel display of the following result types: Momentary RMS value (Actual), minimum RMS (Min), maximum RMS (Max), average RMS (Average)
- Measurement ranges and units:

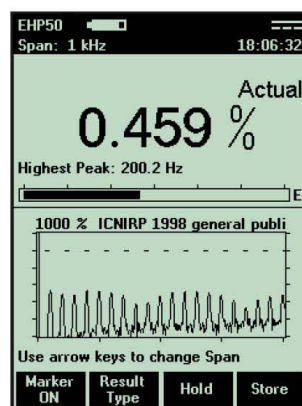
Electric field:	0.0001 to 100 kV/m
	0.001 to 1000 V/m
Magnetic field:	0.0001 to 10 mT
	0.0001 to 100 μ T
	Results can also be displayed in Gauss
- Frequency range selection in 8 steps
Span (Fstop) = 100/200/500 Hz, 1/2/10/100/400 kHz
- Numerical display of wideband measurement value or the highest value in the spectrum (Highest Peak)

Special evaluations

- Timer controlled measurement with selectable save intervals (Timer Logging)
- Averaging function for 4 / 8 / 16 / 32 samples
- Marker function for evaluating the spectrum graphics and the graphics for Weighted Peak vs. time

Warning functions

- Audible warning variable thresholds separately settable for electric and magnetic field



Standard mode displays the spectrum of the measured field, evaluated e.g. according to the ICNIRP guidelines. The dotted line represents the limit value (100%).



NBM-550 with EHP-50F: The perfect solution for all industrial applications.

Operation

- User-defined setups make it easy to recall device settings
- Battery saving user-selectable timed auto-off function
- Hold button “freezes” measurement result for easy readout
- Keypad lock prevents inadvertent operation of control keys

Remote control

- NBM-TS PC software enables remote controlled measurements (EHP-TS should be used for remote control of the EHP-50F)
- PC connection via USB or optical interface
- Additional freedom of movement for probes provided by using an extension and optical cable. The NBM-550 controller function enables data communication with the smaller NBM-520 for use as a “probe extension handle”. This makes it possible to locate the probe remotely from the NBM-550 control unit without the adverse effects on the measurement that would be caused by metallic connecting cables.



Left:
 Probe extension using an optical cable. The NBM-550 acts as controller and displays the results. The smaller NBM-520 acts as the optical probe interface. Both devices can also be used separately as measuring devices when fitted with probes.

Result storage and evaluation

- Data memory for up to 5000 results
- External trigger input for data storage (e.g. for connecting to an odometer)
- Timer Logging for timer controlled data storage (e.g. for long-term monitoring)
- Conditional Logging: Stores measurement data when a threshold value is exceeded when using a high frequency probe
- Screenshot download as bitmap for simple documentation
- “NBM-TS” PC software for convenient data management, documentation and subsequent evaluations

Other functions

- GPS interface and plug-in GPS receiver (accessory) for automatic storage of position data
- Audio recorder for voice comments, with built in microphone, and earphone output; transfer to PC



Above: The battery compartment is opened easily using a coin. Four replaceable NiMH rechargeable batteries (AA size) are used to power the device.

Below:

Open the protective rubber cover to access the connectors: Charger socket, optical interface, headphone connector and the multi purpose GPS / USB/external trigger connector.

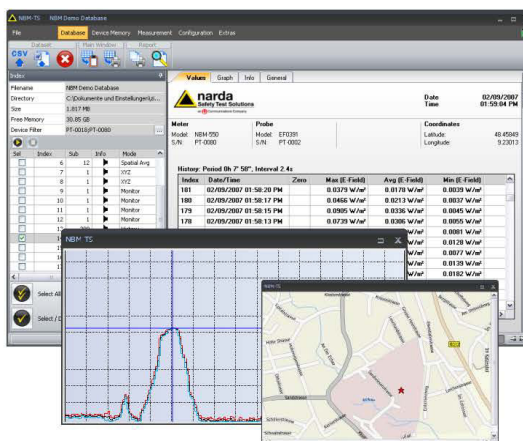


GPS receiver connected to the NBM-550

PC SOFTWARE

The comprehensive, easy to use "NBM-TS" PC software (included) provides the following functions:

- Result transfer to a PC
- Result database management
- Result evaluations
- Device configuration management
- Firmware update control
- Remote controlled measurements



STANDARDS

Safety limits are already stored in the NBM-550 for a variety of standards. In addition, users can also create their own standards. This allows direct display of results for flat probes in % of limit value at a known frequency of the field under test.

Safety Standard	Region	Safety Standard	Region
2013/35/EU Limbs	European Union	ICNIRP 1998 Occupational	International
2013/35/EU High ALs	European Union	ICNIRP 1998 General Pub	International
2013/35/EU Low ALs	European Union	ICNIRP 2010 Occupational	International
BGV B11 2h/d	Germany	ICNIRP 2010 General Pub	International
BGV B11 Area 1	Germany	IEEE C95.1 Upper Tier	International
BGV B11 Area 2	Germany	IEEE C95.1 General Pub	International
FCC 1997 Occupational	USA	Safety Code 6 1999 RF Work	Canada
FCC 1997 General Pop	USA	Safety Code 6 1999 Gen Pub	Canada
GB8702-2014	China	Safety Code 6 2015 Controlled	Canada
		Safety Code 6 2015 Uncontrld	Canada

APPLICATIONS - HIGH FREQUENCY PROBES

Frequency range	300 kHz to 30 MHz	27 MHz to 1 GHz	100 kHz to 3 GHz	100 kHz to 6 GHz	3 MHz to 18 GHz	40 MHz to 40 GHz	300 MHz to 50 GHz	100 MHz to 60 GHz	100 MHz to 90 GHz	300 kHz* to 50 GHz
Field type	H	H	E	E	E	E	E	E	E	E Shaped
Probe designation	HF3061	HF0191	EF0391 EF0392	EF0691	EF1891	EF4091	EF5091 EF5092	EF6092	EF9091	EA ... ED5091
Mobile radio / telecommunications	●	●	●	●	●					●
Radio / TV broadcasting	●	●	●	●	●					●
Satellite communications					●	●	●	●	●	○
Radar					○	○	●	○	●	○
Industry: Heating and tempering	●		●	●						
Industry: Plastics welding	●		●	●						
Industry: Semiconductor production	○		●	●						
Medicine: Diathermy, hyperthermy			●	●						○
Leak detection					●	●	●	●	●	○
General public safety	●	○	●	●	●	●	○	●	●	○
Health and safety at work	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

*) EB5091: 3 MHz – 50 GHz

● more important

○ variable importance

SPECIFICATIONS

NBM-550													
DISPLAY													
Display type	Transflective LCD, monochrome												
Display size	10 cm (4"), 240 x 320 dots												
Backlight	White LEDs, selectable illumination time (OFF, 5s, 10s, 30s, 60s, PERMANENT)												
Refresh rate	200 ms for bar graph and graphics, 400 ms for numerical results												
Operating languages	English, French, German, Italian, Spanish, Simplified Chinese, Turkish, Russian												
MEASUREMENT FUNCTIONS (with high frequency probes)													
Result units	mW/cm ² , W/m ² , V/m, A/m, % (of standard)												
Display range	.0001 to 9999, 4 digits, variable or fixed triads can be selected <table border="0"> <tr> <td><u>Variable triads</u></td><td><u>Fixed triads</u></td></tr> <tr> <td>0.01 V/m to 100.0 kV/m</td><td>0.01 to 9999 V/m</td></tr> <tr> <td>0.01 mA/m to 265.3 A/m</td><td>0.0001 to 265.3 A/m</td></tr> <tr> <td>0.001 mW/m² to 26.53 MW/m²</td><td>0.0001 to 9999 W/m²</td></tr> <tr> <td>0.1 nW/cm² to 2.653 kW/cm²</td><td>0.0001 to 9999 mW/cm²</td></tr> <tr> <td>0.0001 % to 9999 %</td><td>0.0001 to 9999 %</td></tr> </table>	<u>Variable triads</u>	<u>Fixed triads</u>	0.01 V/m to 100.0 kV/m	0.01 to 9999 V/m	0.01 mA/m to 265.3 A/m	0.0001 to 265.3 A/m	0.001 mW/m ² to 26.53 MW/m ²	0.0001 to 9999 W/m ²	0.1 nW/cm ² to 2.653 kW/cm ²	0.0001 to 9999 mW/cm ²	0.0001 % to 9999 %	0.0001 to 9999 %
<u>Variable triads</u>	<u>Fixed triads</u>												
0.01 V/m to 100.0 kV/m	0.01 to 9999 V/m												
0.01 mA/m to 265.3 A/m	0.0001 to 265.3 A/m												
0.001 mW/m ² to 26.53 MW/m ²	0.0001 to 9999 W/m ²												
0.1 nW/cm ² to 2.653 kW/cm ²	0.0001 to 9999 mW/cm ²												
0.0001 % to 9999 %	0.0001 to 9999 %												
Result types (RMS, isotropic)	Actual, Maximum, Minimum, Average, Average Maximum												
Result types (RMS, X-Y-Z mode)	Actual X, Actual Y, Actual Z (requires a probe with separate axes)												
Time averaging	Selectable averaging time, 4 s to 30 min (2 s steps)												
Spatial averaging	Discrete or continuously												
Multi-position spatial averaging	Averages up to 24 spatially averaged results, each position and total is stored												
History Mode	Graphical display of Actual RMS results versus time (span of 2 minutes to 8 hours)												
Correction frequency	1 kHz to 100 GHz or OFF (direct frequency entry, interpolation between calibration points)												
Hot Spot Search	Audible indication of increasing and decreasing field strength (result type Act or Max)												
Alarm function	2 kHz audible signal (4 Hz repetition), adjustable threshold												
Timer Logging	Start time pre-selection: up to 24 h or immediate start Logging duration: up to 100 h Logging interval: 1s to 6 min (in 11 steps)												
RESULT MEMORY													
Physical memory	12 MB non-volatile flash memory for measurement results and voice comments												
Storage capacity	Up to 5000 results (including instrument settings, time stamp and GPS data when available)												
INTERFACES													
Remote control	Via USB or optical RS-232 interface (selectable)												
- USB	Serial, full duplex, 460800 baud (virtual COM port), multi-pin connector												
- Optical interface	Serial, full duplex, 115200 baud, no parity, 1 start and 1 stop bit												
Earphone	3.5 mm TRS, ≥ 16 ohms (mono), see accessories												
External trigger (for result storage)	Uses the multi-pin connector. Interface cable with BNC connector available as accessory Triggers when contacts short-circuited												
External GPS receiver	Uses the multi-pin connector; GPS receiver with interface cable available as accessory												
Probe interface	Plug-and-play auto detection, compatible with all NBM series probes RMS integration time for measuring input approx. 270 ms Measurement sampling rate 5 Hz (5/ 50/ 60 Hz for remote operation)												

OTHER FUNCTIONS	
Conditional Logging	
Logging conditions	Selectable: - On upper threshold: Results stored when measurements exceed the adjustable threshold - Out of gap: Results stored when measurements are above the upper threshold or below the lower threshold
Logging range	Selectable: - Store all (as long as the condition is true), sampling rate 5 Hz - Store first and last event (when the condition was true)
Voice Recorder	
Microphone	Built in microphone located at the top of the instrument near the Narda logo
Recording level	Fixed level, VU meter for level monitoring displayed when recording
Recording length	30 s max. length per voice comment, 1 voice comment stored with relevant result
Recording format	8-bit PCM mono, stored as WAV file (approx. 240 kbyte per 30 s)
Output	External earphone (adjustable output level) or via NBM-TS PC software
GPS Position Logging	
Receiver type	With attached GPS receiver (GPS Kit available as accessory) GPS Standard Positioning Service and Differential GPS (DGPS) capability using real-time WAAS/EGNOS correction
Displayed position data	Latitude (Lat) and longitude (Long), selectable units: DMS (degrees, minutes, seconds)/ MinDec (decimal minutes)/ DegDec (decimal degrees)
Geodetic system	WGS84/ NAD83
Position accuracy	< 3 m (Differential GPS), <15 m (Standard GPS), high precision mode indicated on the NBM-550. Accuracy specified for 95 % probability
Update rate	1 s
Receiver size/ weight	61 mm diameter x 19.5 mm high / 62 g (approx. 100 g with mounting plate)
Receiver mounting	Uses the tripod thread on underside of device, mounting plate included
GENERAL SPECIFICATIONS	
Recommended calibration interval	24 months (basic unit only, probes are specified separately)
Battery	NiMH rechargeable batteries, 4 x AA size (Mignon), 2700 mAh, included
Operation time	20 hours (backlight off, no GPS) 12 hours (permanent backlight, no GPS) 10 hours (GPS receiver connected, no backlight)
Charging time	2 hours
Battery level display	100%, 80%, 60%, 40%, 20%, 10%, low level (< 5%)
Temperature range	Operating -10 °C to +50 °C Non-operating (transport) -30 °C to +70 °C
Humidity	5 to 95%, non condensing ≤29 g/m³ absolute humidity (IEC 60721-3-2 class 7K2)
Size (h x w x d)	45 x 98 x 280 mm (without probe and GPS receiver)
Weight	550 g (without probe and GPS receiver).
Accessories (included)	Hard case, power supply, rechargeable batteries, shoulder strap, tripod (bench top), NBM-TS software, operating manual, certificate of calibration, USB cable interface
Country of origin	Germany

www.narda-sts.com



This product is protected by the following patents:

China Design Patent ZL 2006 3 0303322.X
 China Design Patent ZL 2006 3 0190679.1
 European Design Patent 000594254-001
 European Design Patent 000597836-0001
 U.S. Design Patent No. US D570,235 S

U.S. Patent No. 5,877,619
 German Patent DE19536948A1

ORDERING INFORMATION

NBM-550	Part Number (P/N)
NBM-500 Set 1, Narda Broadband Field Meter <i>- Probes are not included -</i> Set includes: - NBM-550 Basic Unit (2401/01B) - Hard case for NBM-500 Series, holds meter and up to 5 probes (2400/90.06) - Power Supply 9VDC, 100V-240VAC (2259/92.06) - Battery, Rechargeable AA-Size, NiMH (4 pcs. 1001-0000-471) - Shoulder Strap, 1m (2244/90.49) - Tripod, bench top, 0.16m (2244/90.32) - Cable, USB Interface for NBM-550, 2 m (2400/90.05) - Software, NBM-TS, PC Transfer (2400/93.01) - Operating Manual NBM-550 - Calibration Certificate	2400/101B
NBM-500 Set 13, 1Hz-6GHz with EHP-50F, NBM-550, EF0691 Set includes: - all parts from NBM-500 Set 1 (2400/101B) - all parts from EHP-50F E&H Field Analyzer Set, 1Hz-400kHz (2404/103) - Probe EF 0691, E-Field, 100kHz-6GHz (2402/14B) - Tripod, Non-Conductive, 1.65m, with Carrying Bag (2244/90.31)	2400/113
NBM-500 Set 15, 1Hz-3GHz with EHP-50F, NBM-550, EF0391 Set includes: - all parts from NBM-500 Set 1 (2400/101B) - all parts from EHP-50F E&H Field Analyzer Set, 1Hz-400kHz (2404/103) - Probe EF 0391, E-Field, 100kHz-3GHz (2402/01B) - Tripod, Non-Conductive, 1.65m, with Carrying Bag (2244/90.31)	2400/115
GPS Kit	See Accessories
HIGH FREQUENCY PROBES *	
Probe HF 3061, H-Field, for NBM, 300kHz-30MHz	2402/05B
Probe HF 0191, H-Field, for NBM, 27MHz-1GHz	2402/06B
Probe EF 0391, E-Field, for NBM, 100kHz-3GHz	2402/01B
Probe EF 0392, E-Field, HiPow, for NBM, 100kHz-3GHz	2402/12B
Probe EF 0691, E-Field, for NBM, 100kHz-6GHz	2402/14B
Probe EF 1891, E-Field, for NBM, 3MHz-18GHz	2402/02B
Probe EF 4091, E-Field, for NBM, 40MHz-40GHz	2402/19B
Probe EF 5091, E-Field, for NBM, 300MHz-50GHz, Thermo.	2402/03B
Probe EF 5092, E-Field, HiPow, for NBM, 300MHz-50GHz, Thermo.	2402/11B
Probe EF 6092, E-Field, for NBM, 100MHz-60GHz	2402/17B
Probe EF 9091, E-Field, for NBM, 100MHz-90GHz	2402/18B
Probe EA 5091, FCC Shaped, for NBM, 300kHz-50GHz, E-Field	2402/07B
Probe EB 5091, IEEE Shaped, for NBM, 3MHz-50GHz, E-Field	2402/08B
Probe ED 5091, ICNIRP Shaped, for NBM, 300kHz-50GHz, E-Field	2402/10B

* See separate data sheets for probe specifications

LOW FREQUENCY PROBE *	
EHP-50F E&H Field Analyzer Set, 1Hz-400kHz, for NBM-550	
Set Includes:	
- EHP-50F Basic Unit (2404/03)	
- AC/DC Battery Charger, for EHP-50 (2259/92.08)	
- Cable, FO Duplex, RP-02, 10m (2260/91.07)	
- Optical Bridge Connector RP-02 (2260/91.08)	
- EHP-TS PC Software (2404/93.01)	
- O/E Converter USB, RP-02/USB (2260/90.07)	
- Tripod Extension, 0.50m, Non-Conductive (2244/90.45)	
- Foam Inserts for EHP-50, for Hardcase 2400/90.06 (2404/90.01)	
	2404/103
ACCESSORIES	
GPS Kit for NBM-550, Receiver and Mounting Set	2400/90.10
Earphone, 3.5mm Plug	2400/90.03
Test-Generator 27 MHz	2244/90.38
Tripod, Non-Conductive, 1.65m, with Carrying Bag	2244/90.31
Tripod Extension, 0.50m, Non-Conductive (for 2244/90.31)	2244/90.45
Handle, Non-Conductive, 0.42m	2250/92.02
Carrying Strap Hardcase, for SRM/NBM-500	3001/90.04
Cable, Coaxial Multi-pin/ BNC, for NBM-550, Ext. Trigger, 2m	2400/90.04
Cable, FO Duplex (1000 µm) RP-02, 2 m	2260/91.02
Cable, FO Duplex (1000 µm) RP-02, 5 m	2260/91.09
Cable, FO Duplex (1000 µm) RP-02, 10 m	2260/91.07
Cable, FO Duplex (1000 µm) RP-02, 20 m	2260/91.03
Cable, FO Duplex (1000 µm) RP-02, 50 m	2260/91.04
Cable, FO Duplex, F-SMA to RP-02, 0.3 m	2260/91.01
O/E Converter RS232, RP-02/DB9	2260/90.06
O/E Converter USB, RP-02/USB	2260/90.07
Cable, Adapter USB 2.0 - RS232, 0.8 m	2260/90.53
Shielding Pouch for NBM-550	2401/90.02

Narda Safety Test Solutions GmbH
 Sandwiesenstraße 7
 72793 Pfullingen, Germany
 Tel. +49 7121 97 32 0
 Fax +49 7121 97 32 790
 support.narda-de@L3T.com
 www.narda-sts.com

Narda Safety Test Solutions
 435 Moreland Road
 Hauppauge, NY 11788, USA
 Phone +1 631 231-1700
 Fax +1 631 231-1711
 NardaSTS@L3T.com
 www.narda-sts.us

Narda Safety Test Solutions Srl
 Via Leonardo da Vinci, 21/23
 20090 Segrate (Milano), Italy
 Phone +39 02 26 998 71
 Fax +39 02 26 998 700
 nardait.support@L3T.com
 www.narda-sts.it

© Names and Logo are registered trademarks of Narda Safety Test Solutions GmbH and L3 Communications Holdings, Inc. - Trade names are trademarks of the owners.

Apéndice D : Certificados de calibración Narda NBM – 550 y Sonda EHP-50F

Narda Safety Test Solutions GmbH
Sandwiesenstrasse 7 - 72793 Pfullingen - Germany
Phone: +49 7121 9732 0 - Fax: +49 7121 9732 790

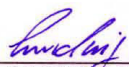


Calibration Certificate

Narda Safety Test Solutions hereby certifies that the object referenced to this certificate has been calibrated by qualified personnel using Narda's approved procedures. The calibration was carried out in accordance with a certified quality management system which conformed to ISO 9001.

OBJECT	Broadband Field Meter NBM-550
MANUFACTURER	Narda Safety Test Solutions GmbH
PART NUMBER (P/N)	2401/01B
SERIAL NUMBER (S/N)	H-0396
CUSTOMER	
CALIBRATION DATE (YYYY-MM-DD)	2018-01-31
RESULT ASSESSMENT	within specifications
AMBIENT CONDITIONS	Temperature: (23 ± 3) °C Relative humidity: (20 to 60) %
CALIBRATION PROCEDURE	2401-8700-00A

ISSUE DATE: 2018-01-31
(YYYY-MM-DD)



CALIBRATED BY
Ludwig



AUTHORIZED SIGNATORY

MANAGEMENT
SYSTEM



This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid.

Certified by DQS according
to ISO 9001:2008
(Reg.-No. 099379 QM08)

CERTIFICATE: NBM-550-H-0396-180131-5070

PAGE 1 OF 3

Narda Safety Test Solutions GmbH
 Sandwiesenstrasse 7 - 72793 Pfullingen - Germany
 Phone: +49 7121 9732 0 - Fax: +49 7121 9732 790



Method of Measurement

The device under test (DUT) represents a three-channel voltage meter offering high accuracy and high resolution. The DUT is calibrated by applying a known DC voltage to each of the inputs.

Uncertainty of Measurement

The measurement uncertainty stated in this document is the expanded uncertainty with a coverage factor of 2 (corresponding, in the case of normal distribution, to a confidence probability of 95 %).

The uncertainty analysis for this calibration was done in accordance with the ISO/TAG-Guide (Guide to the expression of uncertainty in measurement). The measurement uncertainties are derived from contributions from the measurement of power, reflection, attenuation and frequency, mismatch, stability of instrumentation and repeatability of handling.

This statement of uncertainty applies to the measured values only and does not include effects like temperature response and long term stability of the calibrated device.

Traceability of Measuring Equipment

The calibration results are traceable to SI-units according to ISO/IEC 17025. Physical units, which are not included in the list of accredited measured quantities such as field strength or power density, are traced to the basic units via approved measurement and computational methods.

The equipment used for this calibration is traceable to the reference listed below and the traceability is guaranteed by ISO 9001 Narda internal procedure.

Reference- / Working- Standard	Manufacturer	Model	Serial Number	Certificate Number	Cal Due Date	Trace
Digital Multimeter	Agilent	34401A	MY47052911	1-8659117607-1	2019-02	UKAS 0147

Narda Safety Test Solutions GmbH
 Sandwiesenstrasse 7 - 72793 Pfullingen - Germany
 Phone: +49 7121 9732 0 - Fax: +49 7121 9732 790



Results

Voltage display uncertainty

Channel	Input voltage applied	Specified voltage display	Meas. Uncertainty	Meas. voltage display
X	2.400 V	(2.376 \pm 0.024) V	\pm 0.007 V	2.370 V
Y	2.400 V	(2.376 \pm 0.024) V	\pm 0.007 V	2.370 V
Z	2.400 V	(2.376 \pm 0.024) V	\pm 0.007 V	2.370 V

Note: Because of an internal voltage divider the nominal indication is 2.376 V.

**Narda Safety Test Solutions S.r.l.**

Sales & Support: Via Leonardo da Vinci 21/23
20090 Segrate (MI)
Tel.: +39 02 2699871 Fax: +39 02 26998700
Manufacturing Plant: Via Benessee, 29/B
17035 Ciano sul Neva (SV)
Tel.: +39 0182 58641 Fax: +39 02 586400

CERTIFICATE OF CALIBRATION

Certificato di taratura

Number 70700
Numero

Item <i>Oggetto</i>	Electric and Magnetic field Probe - Analyzer
Manufacturer <i>Costruttore</i>	Narda S.T.S. / PMM
Model <i>Modello</i>	EHP50F
Serial number <i>Matricola</i>	100WY70700
Calibration procedure <i>Procedura di taratura</i>	Internal procedure PTP 09-31
Date(s) of measurements <i>Data(e) delle misure</i>	11.01.2018
Result of calibration <i>Risultato della taratura</i>	Measurements results within specifications

This calibration certificate documents the traceability to national/international standards, which realise the physical units of measurements according to the International System of Units (SI). Verification of traceability is guaranteed by mentioning used equipment included in the measurement chain. This equipment includes reference standard directly traceable to (inter)national standard (accuracy rating A) and working standard calibrated by the calibration laboratory of Narda Safety Test Solutions (accuracy rating B) by means of reference standard A or by other calibration laboratory.

The measurement uncertainties stated in this document are estimated at the level of twice the standard deviation (corresponding, in the case of normal distribution, to a confidence level of about 95%). The uncertainties are calculated in conformity to the ISO Guide (Guide to the expression of uncertainty in measurement). The metrological confirmation system for the measuring equipment used is in compliance with ISO 10012-1. The applied quality system is certified to UNI EN ISO 9001.

Questo certificato di taratura documenta la tracciabilità a campioni primari nazionali o internazionali i quali realizzano la riferibilità alle unità fisiche del Sistema Internazionale delle Unità (SI). La verifica della tracciabilità è garantita elencando gli strumenti presenti nella catena di misura. La catena di riferibilità metrologica fa riferimento a campioni di prima linea direttamente riferiti a standard (internazionali) (classe A), di seconda linea, tarati nel laboratorio metrologico della Narda Safety Test Solutions con riferibilità ai campioni di prima linea oppure tarati da Enti esterni accreditati (classe B).

Le incertezze di misura dichiarate in questo documento sono espresse come due volte lo scarto tipo (corrispondente, nel caso di distribuzione normale, a un livello di confidenza di circa 95%). Le incertezze di misura sono calcolate in riferimento alla guida ISO. La conferma metrologica della strumentazione usata è conforme alla ISO 10012-1. Il sistema di qualità è certificato ISO 9001.

COMPANY WITH QUALITY MANAGEMENT
SYSTEM CERTIFIED BY DNV
= ISO 9001:2008 =

Date of issue
Data di emissione

17.01.2018

Measure operator
Operatore misura

F. Ferrari

Person responsible
Responsabile

G. Basso

This calibration certificate may not be reproduced other than in full. Calibration certificate without signature are not valid. The user is recommended to have the object recalibrated at appropriate intervals.
La riproduzione del presente documento è ammessa in copia conforme integrale. Il certificato non è valido in assenza di firma. All'utente dello strumento è raccomandata la ricalibrazione nell'appropriato intervallo di tempo.

The calibration was carried out at an ambient temperature of $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$ and at a relative humidity of $(50 \pm 10/-20)\%$.

Calibration method

The magnetic calibration was set up with the probe in a region of uniform magnetic field at the centre of a calibrated Helmholtz coil system. The magnetic flux density is calculated from the current flowing in the coil. The current waveform was sinusoidal. The current in the Helmholtz coil system was adjusted to produce a series of indicated magnetic flux densities on the instrument at various frequencies. The calibration procedure agrees with the indication of IEC 61786 "Measurement of low frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings- Special requirements for instruments". The instrument readings were recorded and the actual values of magnetic flux density were calculated from the measured currents. The magnetic correction factor (CF) is defined as rapport between actual and indicated magnetic flux density.

$$CF = \frac{B_o}{B_{mis}}$$

where B_o is the applied magnetic flux density and B_{mis} is the indicated magnetic flux density

For the electric calibration the probe is positioned inside a big TEM cell (section 1.8x1.8 mete). For each measurement, the input voltage was adjusted so that the field strength was set to a specified reading on the monitor.

The actual field strength, at the plane of reference of the probe was then determined and the correction factor calculated using the following definition.

$$CF = \frac{E_o}{E_{mis}}$$

where E_o is the applied field strength and E_{mis} is the indicated field strength

The correction factor data are permanently stored in the internal EEPROM.

Calibration equipment and traceability

ID Number	Description	Manufacturer	Model	Trace
PMM 391	Digital multimeter	Agilent	34401A	/UKAS
CMR 169	Electric and Magnetic ref. Probe	Narda	EHP50C-REF	/INRIM
CMR 090	Standard resistor	Narda	PMM BSD250	/NPL
CMR 095	Current Trasformer	Frer	AP10-1TAC010	/INRIM
CMR 001	TEM Cell	Narda	1818	/Narda
CMR 020	Helmholtz coil	Narda	HCSS001	/Narda

Uncertainty of measurements

The statement of uncertainty (see first page) does not make any implication or include any estimation as to the long term stability of the calibrated monitor. The relative expanded uncertainty result are given below

E field	3% at 50 Hz 5.3% other frequencies
H field	2% at 50 Hz with 100 μT range 3.5% at 50 Hz with 10mT range 3% other frequencies

Results

The results of measurements in the following pages were obtained after calibration data storing and indicates the residual of the reciprocal CF.

The results given on the tables were obtained with the axis aligned at the electric vector for electric measurements and with axis concatenated at the magnetic flux density for magnetic measurements

The shown limits of the EHP50F specification in the diagrams are in orange.

Electric field

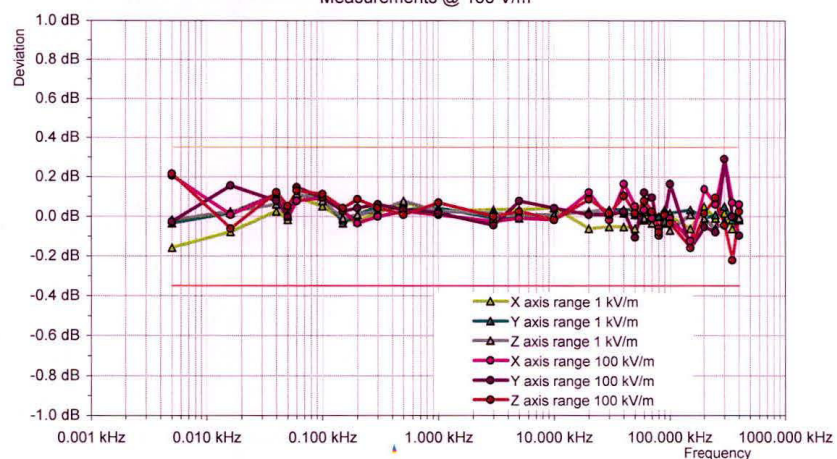
Frequency response for each axis at nominal field of 100 V/m.

The instrument was set as electric field measure with 100 Hz span up to the frequency of 100 Hz, 200 Hz span up to the frequency of 200 Hz, 500 Hz span up to the frequency of 500 Hz, 1 kHz up to 1000 Hz, 10 kHz up to 10 kHz, 100 kHz up to 100 kHz and span 400 kHz for frequency over 100 kHz.

Freq. (kHz)	Deviation with 1kV/m range			Deviation with 100 kV/m range		
	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z axis
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
0.005	-0.16	-0.03	-0.02	0.21	-0.03	0.21
0.016	-0.08	0.02	0.03	0.01	0.15	-0.06
0.04	0.03	0.11	0.06	0.11	0.08	0.12
0.05	-0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05
0.06	0.10	0.10	0.11	0.08	0.15	0.13
0.10	0.05	0.10	0.08	0.10	0.10	0.11
0.15	-0.02	-0.03	-0.01	0.03	0.03	0.04
0.20	-0.03	0.01	0.01	-0.03	0.04	0.09
0.30	0.02	0.05	0.03	0.00	0.06	0.04
0.50	0.07	0.03	0.08	0.03	0.03	0.01
1.0	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.07
3.0	0.03	-0.01	0.02	-0.03	-0.04	0.00
5.0	0.03	-0.01	0.01	-0.01	0.08	0.03
10.0	0.04	0.01	0.01	-0.02	0.04	-0.02
20.0	-0.06	0.03	0.03	0.12	0.01	0.09
30.0	-0.05	0.03	0.03	-0.02	0.01	0.02
40.0	-0.05	0.03	0.02	0.16	0.03	0.10
50.0	-0.06	0.03	0.01	0.05	-0.10	0.02
60.0	-0.02	0.03	-0.01	0.03	0.12	0.08
70.0	0.03	0.02	-0.03	-0.01	0.10	0.03
80.0	0.00	0.00	-0.06	-0.06	-0.10	-0.08
90.0	-0.03	-0.03	0.03	0.02	0.01	0.01
100.0	0.00	0.02	-0.07	-0.01	0.16	-0.03
150.0	-0.06	0.03	0.01	-0.12	-0.16	-0.16
200.0	0.05	-0.01	-0.01	0.14	-0.05	0.02
250.0	-0.01	0.01	-0.06	0.06	-0.08	0.10
300.0	0.02	0.05	-0.03	0.29	0.29	-0.04
350.0	-0.06	-0.02	0.01	0.07	0.00	-0.22
400.0	-0.02	0.00	-0.01	0.06	-0.10	0.03

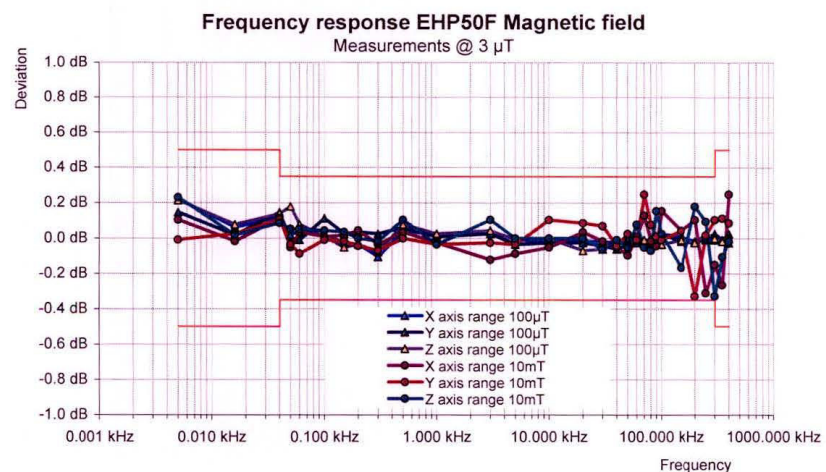
Frequency response EHP50F Electric field

Measurements @ 100 V/m



Magnetic Field Frequency response for each axis at nominal magnetic flux density of $3\mu\text{T}$.
 The instrument was set as magnetic field measure with 100 Hz span up to the frequency of 100 Hz,
 200 Hz span up to the frequency of 200 Hz, 500 Hz span up to the frequency of 500 Hz,
 1 kHz up to 1000 Hz, 10 kHz up to 10 kHz, 100 kHz up to 100 kHz and span for frequency over 100 kHz

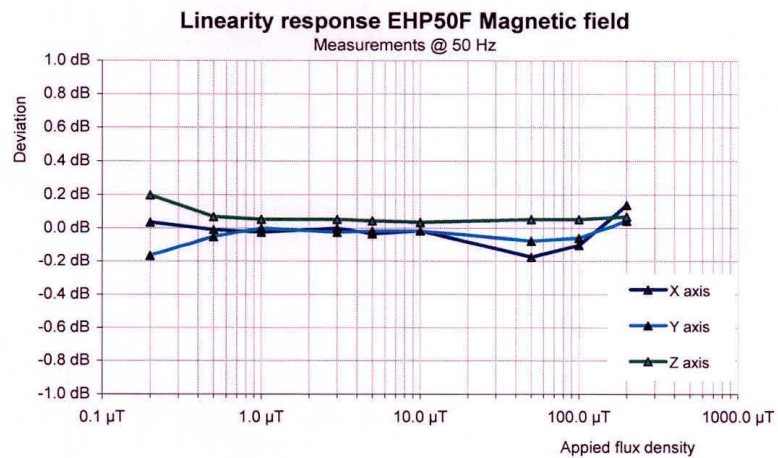
Freq. (kHz)	Deviation with 100 μT range			Deviation with 10mT range		
	X axis	Y axis	Z axis	X axis	Y axis	Z axis
	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)	(dB)
0.005	0.22	0.15	0.21	0.10	-0.01	0.23
0.016	0.06	0.02	0.08	-0.02	0.03	0.02
0.04	0.12	0.15	0.14	0.11	0.10	0.09
0.05	0.02	-0.02	0.18	-0.05	-0.03	0.05
0.06	0.04	-0.01	0.08	0.03	-0.09	0.05
0.10	0.02	0.11	0.01	0.01	-0.01	0.04
0.15	-0.03	0.03	-0.05	0.02	-0.02	0.03
0.20	-0.03	0.03	-0.03	0.04	-0.04	0.00
0.30	-0.10	0.03	-0.08	-0.03	-0.07	-0.02
0.50	0.04	0.06	0.08	0.03	0.00	0.10
1.0	0.02	0.01	0.03	-0.03	-0.03	-0.03
3.0	0.04	0.03	0.04	-0.12	-0.03	0.10
5.0	-0.01	-0.03	-0.01	-0.09	-0.03	0.00
10.0	-0.02	-0.03	0.00	-0.05	0.10	0.00
20.0	-0.02	-0.03	-0.07	0.03	0.09	0.00
30.0	-0.02	-0.04	-0.06	-0.02	0.07	-0.06
40.0	-0.03	-0.06	-0.03	-0.05	-0.04	-0.01
50.0	-0.01	-0.03	0.03	-0.10	0.03	-0.05
60.0	-0.02	-0.03	0.01	0.01	-0.01	0.08
70.0	-0.02	-0.01	-0.01	0.13	0.25	-0.05
80.0	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02	0.08	-0.07
90.0	-0.03	-0.03	-0.02	-0.04	0.01	0.15
100.0	0.03	0.03	-0.03	0.15	-0.01	0.03
150.0	0.01	-0.02	-0.01	0.04	0.04	-0.17
200.0	-0.02	-0.03	-0.03	0.10	-0.33	0.18
250.0	-0.01	0.00	0.03	-0.31	0.02	0.10
300.0	-0.01	0.03	0.00	-0.15	0.10	-0.33
350.0	-0.02	-0.01	-0.02	-0.26	0.11	-0.10
400.0	-0.03	0.03	0.00	0.25	0.09	-0.02



Magnetic Field Linearity response for each axis at applied frequency of 50 Hz and magnetic flux density below
 The instrument was set with 100 Hz span.

Applied flux density (μT)	Deviation		
	X axis (dB)	Y axis (dB)	Z axis (dB)
0.2	0.03	-0.17	0.20
0.5	-0.01	-0.05	0.07
1.0	-0.03	0.00	0.05
3.0	0.00	-0.03	0.05
5.0	-0.03	-0.02	0.04
10	-0.02	-0.02	0.03
50	-0.18	-0.08	0.05
100	-0.10	-0.06	0.05
200	0.14	0.04	0.07

X axis linearity 0.16 dB
 Y axis linearity 0.10 dB
 Z axis linearity 0.08 dB





Determining the Recalibration Due Date

Determinazione della data di ricalibrazione

The Certificate of Calibration accompanying this product states the date that this unit was calibrated according to Narda Safety Test Solutions procedures. We have determined that the calibration of this product is not affected by storage prior to its initial receipt by the customer.

The recalibration of this unit should be based on the date when the product is put into service, plus the recommended calibration interval.

The Narda Safety Test Solutions recommended calibration interval is 24 months. To determine the date for recalibration, the customer should use the appropriate start date, and apply either the Narda Safety Test Solutions calibration interval, or an interval that satisfies their own organization's internal quality system requirements.

Il certificato di taratura che accompagna questo strumento attesta la data di taratura, quest'ultima eseguita in accordo alle procedure interne. La Narda Safety Test Solutions assicura che la taratura dello strumento non viene alterata da eventuali tempi di attesa prima del ricevimento da parte del cliente. La ri-taratura di questo strumento dovrebbe essere effettuata adottando appropriati intervalli di taratura, a partire dalla data di messa in servizio.

La Narda Safety Test Solutions raccomanda un massimo intervallo di taratura di 24 mesi. Per determinare la data di ri-taratura, l'utente dovrebbe considerare l'intervallo raccomandato dalla Narda Safety Test Solutions o un intervallo che soddisfa i requisiti interni di qualità della propria organizzazione.

Model

Modello

Serial Number

Matricola

Put into service date

Data di messa in servizio

For additional information please contact

Per informazioni aggiuntive

Narda S.T.S. Calibration Laboratory

Via Benessea, 29/B

17035 Cisano sul Neva (SV) - Italy

Tel.: +39 0182 58641 Fax: +39 0182 586400

Apéndice E: Datos totales de medición de radiaciones no ionizantes usando el NBM –

550

La Tabla E.1, muestra las mediciones realizadas durante todo el proceso de comprobación y análisis de resultados.

Tabla E.1

Datos medidos por el NBM – 550 usando la sonda EHP-50F

Date/Time	Avg (H-Field) [mT]	Max (H-Field) [mT]
13/03/2018 11:41:52	0.00053	0.00056
14/03/2018 17:33:56	0.473	0.47342
2/05/2018 13:30:44	0.32154	0.32183
3/05/2018 13:46:53	0.32538	0.32586
3/05/2018 13:47:01	0.32558	0.32603
3/05/2018 13:47:15	0.3258	0.32653
17/05/2018 13:31:40	0.02713	0.02713
17/05/2018 13:32:37	0.03449	0.041
17/05/2018 13:33:40	0.12015	0.12034
17/05/2018 13:34:36	0.64021	0.64152
17/05/2018 13:37:00	0.52295	0.52553
17/05/2018 13:39:02	0.00012	0.00018
17/05/2018 13:39:41	0.00011	0.00014
18/05/2018 15:55:18	0.43761	0.43795
18/05/2018 16:02:28	0.43767	0.43808
31/05/2018 12:17:22	0.8262	1.09023
31/05/2018 12:31:54	0.1607	0.1623
31/05/2018 12:34:01	0.97538	1.40524
1/06/2018 14:21:09	0.72648	0.89043
1/06/2018 14:27:38	0.79412	0.89043
1/06/2018 14:32:37	0.0107756	0.0120821
4/06/2018 13:14:41	0.79883	0.86473
4/06/2018 13:15:42	0.007724	0.008988
6/06/2018 16:02:26	0.79177	0.79322
6/06/2018 16:03:17	0.010444	0.0135349
8/06/2018 15:32:26	0.79547	0.79698

8/06/2018 15:34:11	0.0106656	0.010749
12/06/2018 13:09:09	0.0074642	0.0074834
12/06/2018 13:11:39	0.79814	0.79828
13/06/2018 13:13:19	0.77418	0.80185
13/06/2018 13:13:55	0.0125608	0.0193737
14/06/2018 12:49:12	0.79111	0.79191
14/06/2018 12:51:21	0.0112907	0.0115159
14/06/2018 12:54:08	1.32259	1.32403
15/06/2018 12:26:25	1.33671	1.34016
15/06/2018 12:27:33	0.0254507	0.0260169
22/06/2018 14:07:53	2.05401	2.08556
22/06/2018 14:08:26	0.0361855	0.0543551
25/06/2018 15:39:44	2.57461	2.57576
25/06/2018 15:40:27	0.0343326	0.0512892
